



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Metodología para la identificación de áreas de interés en la exploración de minerales radiactivos

Seiry Soleny Vargas Tejedor

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias agrarias, Escuela de Posgrados
Bogotá, Colombia
2014

Metodología para la identificación de áreas de interés en la exploración de minerales radiactivos

Seiry Soleny Vargas Tejedor

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

MAGISTER EN GEOMATICA

Ing. Msc. Alberto Boada

Línea de Investigación:

Geomatica para el uso sostenible de los recursos naturales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias agrarias, Escuela de Posgrados

Bogotá, Colombia

2014

*A Dios padre todo poderoso por ser mi guía,
apoyo, sustento...Mi todo, A mis hermanos por ser la
palabra de ánimo, a mis padres por su amor,
formación y enseñanzas las cuales fueron la base
para cumplir este sueño.*

Agradecimientos

Al Servicio Geológico Colombiano SGC en especial al grupo de Exploración de Uranio 2008- 2010 por las grandes enseñanzas que recibí las cuales me acompañaran siempre.

A los geólogos Leopoldo González y Francisco Velandia por haberme brindado la oportunidad de pertenecer al SGC especialmente al grupo de Recursos Energéticos.

A los geólogos Leopoldo González, Raúl Muñoz, Adrián Pérez, Hernán Gómez, Luis Vásquez quienes participaron en la exploración donde se recolectaron los datos fuente de la presente investigación.

A los profesores Alberto Boada, Martha Patricia Bohórquez y Luis Fernando Santa por su apoyo, guía, enseñanzas y recomendaciones.

Al departamento de estadística de la Universidad Nacional de Colombia especialmente al estudiante Daniel Mauricio Jiménez Gutiérrez quien a través de la materia consultoría de estadística apoyó el análisis realizado a los datos.

Al Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC a través del Centro de Investigación Y Desarrollo en Información Geográfica CIAF la oportunidad de aprender nuevos conocimientos para ser aplicados en el presente trabajo.

A la Universidad Nacional de Colombia por brindarme el apoyo académico a través de diferentes facultades para la realización de la presente investigación

A todas aquellas personas que brindaron su apoyo, compañía y paciencia durante el desarrollo de esta maestría.

Resumen

La energía nuclear constituye actualmente una de las principales fuentes de energía a nivel mundial así que investigaciones orientadas a ofrecer nuevas herramientas para la prospección de minerales radiactivos como combustible para su generación son de gran importancia. El presente trabajo tiene como objetivo mostrar como a través de la geomatica se puede profundizar y emplear diversos métodos que amplíen el conocimiento de este tipo de minerales. Para esto se partió de datos recolectados por el servicio geológico colombiano SGC en el año 2010 en una área de 580 Km² ubicada en los departamentos de Boyacá y Santander; específicamente se utilizó información geológica y de gamma espectrometría de aproximadamente 780 estaciones con valores de Uranio, Torio y Potasio, así mismo haciendo uso de la geoestadística, el análisis y modelamiento espacial de las diferentes capas de información y el análisis preliminar a través de sensores remotos se planteó una metodología para identificación y espacialización de zonas de mayor interés para estos minerales usando la geomatica como eje principal; estas áreas fueron ubicadas a lo largo de las Formaciones Paja, Tablazo y Rosablanca principalmente, a su vez con el análisis preliminar realizado a una imagen Landsat 7 se pudo establecer que con la aplicación de mejoramientos espectrales (ratios, eliminación de la vegetación entre otros) se lograron resaltar características estructurales y litológicas del área, especialmente las rocas con contenidos de carbonatos de Calcio y Cuarzo, como las formaciones Arcabuco y Rosablanca.

Palabras clave: Radiactividad, Minerales Radiactivos, geoestadística, Modelamiento Espacial, Geomatica, Gamma Espectrometría, Uranio, Torio, Potasio, sensores remotos

Abstract

Nuclear energy makes up one of the actual principal energy sources worldwide so that research projects orientated to offer diverse tools for searching radioactive minerals are of great importance.

This work seeks to show ways to deepen and apply several methods through geomatics expanding the knowledge of such minerals.

It is based on data collected by the Colombian Geological Service (SGC for its acronym in Spanish) in 2010 in an area of 580 square kilometers located in the departments of Boyacá and Santander, specifically geological information and gamma spectrometry of approximately 780 stations with Uranium, Thorium and Potassium values was used.

Using geostatistics, spatial analysis and modeling of different information layers and the preliminary analysis through remote sensing, forming a main axis of geomatics, led to propose a methodology identifying and spatially locating areas of higher interest of these minerals.

These areas where mainly situated along the Paja, Tablazo and Rosablanca formations, identified through a preliminary analysis realized with an image Landsat 7. The application of spectral index for visual improvement (ratios, elimination of vegetation and others) could establish the stand out of structural and lithological characteristics of the area, especially rocs with the carbonates calcium and quartz of the Arcabuco and Rosablanca formations.

Keywords: Radioactivity, radioactive minerals, geostatistics, spatial modeling, geomatics, Gamma spectrometry, Uranium, Thorium, Potassium, remote sensing

Contenido

	Pág.
Resumen	5
Abstract.....	6
Lista de Figuras.....	9
Lista de tablas	11
Introducción	12
Objetivos.....	15
1. MARCO TEORICO	16
1.1 Variables Geofísicas	16
1.2 Geoestadística.....	18
1.3 Análisis y Modelamiento Espacial.....	20
1.4 Sensores Remotos	23
2. MATERIALES Y METODOS.....	26
2.1 Localización del área de estudio.....	26
2.2 Datos Geofísicos	27
2.3 Características Geológicas	29
2.4 Sensores remotos.....	30
2.5 Metodología.....	30
2.5.1 Análisis Geoestadístico.	32
2.5.2 Modelado en sistemas de información geográfica.....	36
2.5.3 Análisis preliminar con sensores remotos	51
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
3.1 Datos atípicos.....	59
3.2 Análisis de Tendencia.....	62
3.3 Estimación de parámetros geoestadísticos y ajuste de modelos	64
3.4 Validación cruzada	65
3.5 Predicción de variables y generación de mapas	67
3.5.1 Potasio.....	67
3.5.2 Torio.....	68
3.5.3 Uranio	69
3.6 Análisis con sensores remotos	69
3.7 Determinación de zonas de interés.....	75

4. Conclusiones y Recomendaciones.....	83
4.1 Conclusiones	83
4.2 Recomendaciones	84
Bibliografía	86

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 2-1.Localización área de estudio	26
Figura 2-2.Equipos utilizados en la exploración de minerales radiactivos para la captura de las variables analizadas.....	27
Figura 2-3. Estaciones de captura de información.....	28
Figura 2-4: Unidades geológicas aflorantes en el área de estudio.....	30
Figura 2-5. Diagrama Metodológico general.....	31
Figura 2-6. Esquema General del análisis Geoestadístico.....	32
Figura 2-7. Calculo de valores atípicos a partir de un diagrama de caja.....	34
Figura 2-8.Modelo cartográfico propuesto para la determinación de zonas de interés en la exploración de minerales radiactivos.....	38
Figura 2-9.Condiciones geológicas del área de estudio.....	39
Figura 2-10.Mapas de predicción de las variables analizadas.....	41
Figura 2-11.Correcciones realizadas imagen Landsat.....	52
Figura 3-1.Gráficas exploratorias para cada una de las variables	55
Figura 3-2. Clasificación de observaciones de las variables K, U y Th en intervalos y ubicación de estas dentro del área de estudio.....	58
Figura 3-3Distribución de datos atípicos y anómalos en las variables Potasio y Uranio .	60
Figura 3-4 Matriz de diagramas de dispersión para las diferentes variables analizadas. Moniquira Boyacá 2010.....	61
Figura 3-5 Diagramas de dispersión variable Uranio sin datos atípicos.....	62
Figura 3-6 Diagramas de dispersión de los residuales del modelo de regresión seleccionado pasó a paso en dirección de la coordenada Norte	63
Figura 3-7 Semivariogramas experimentales y ajustes de modelos teóricos para el uranio, torio y potasio medido en Moniquira .Boyacá 2010.....	67
Figura 3-8. Izq. Mapa de predicción de la variable Potasio. Der. Mapa Geológico.	68
Figura 3-9.Izq. Mapa de predicción de la variable Torio. Der. Mapa Geológico	69
Figura 3-10.Izq.Mapa de predicción de la variable Uranio. Der. Mapa Geológico.....	69
Figura 3-11. Características estructurales resaltadas	71
Figura 3-12. Áreas urbanas con mayor definición.....	71
Figura 3-13. Imagen Resultado mejoramiento - Ratio Tm3/Tm1	72
Figura 3-14. Comparación imagen resultado mejoramiento (Ratio Tm4/Tm1) Izq. Con imagen Original Der.	72
Figura 3-15. Vista en campo de algunos de los lugares donde afloran calizas en el área que se resalta en la Figura 3-14	73

Figura 3-16. Comparación imagen Resultado mejoramiento ratio (Tm3/ Tm7)- con mapa geológico	73
Figura 3-17. Imagen en combinación TM3/TM4, TM3/TM1, TM3/TM4 (RGB)	74
Figura 3-18. <i>Rasgos estructurales resaltados</i>	74
Figura 3-19 . Esquema de Operaciones de superposición para la determinación de zonas de interés en la exploración de minerales radiactivos.....	76
Figura 3-20 . Zona interés variable Uranio.....	77
Figura 3-21 . Zonas de interés variable Potasio.....	79
Figura 3-22 . Zonas de interés variable Potasio.....	81

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1.1. Concentración de Uranio (ppm), Torio (ppm) y Potasio (%) para algunas rocas sedimentarias.	18
Tabla 1.2. Tipos de predictores Kriging y sus propiedades.	20
Tabla 1.3. Ratios y aplicaciones en imágenes Landsat	24
Tabla 2.1. Características de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio	29
Tabla 2.2. Edad de las rocas en el área de estudio	39
Tabla 2.3. Anomalías reportadas en el área de estudio.	40
Tabla 2.4. Escala de Valoración.	42
Tabla 2.5. Principales consideraciones sobre la ocurrencia del Torio.	43
Tabla 2.6. Principales consideraciones sobre la ocurrencia del Potasio	43
Tabla 2.7. Principales consideraciones sobre la ocurrencia de los radioelementos Uranio	44
Tabla 2.8. Discretización del componente formación geológica- tipo de roca para las variables analizadas.	44
Tabla 2.9. Calificación factor Edad	46
Tabla 2.10. Anomalías reportadas en el área de estudio.	47
Tabla 2.11. Rango de contenidos de Uranio, Torio y Potasio para las diferentes variables.	48
Tabla 2.12. Capas obtenidas a partir de la discretización dada. (Variables Uranio y Torio)	49
Tabla 2.13. Capas obtenidas a partir de la calificación dada. (Variable Potasio)	50
Tabla 3.1. Estadísticas descriptivas de las variables. Datos medidos en la región de Moniquira Boyacá 2010.	54
Tabla 3.3. Matriz de correlación	59
Tabla 3.4. Medidas de variabilidad	60
Tabla 3.5. Medidas descriptivas y gráficos exploratorio sin datos anómalos variable Uranio	62
Tabla 3.6. Medidas de variabilidad y Gráficas exploratorias variable Torio	63
Tabla 3.7. Modelos de semivarianza ajustados y parámetros.	65
Tabla 3.8. Parámetros modelos seleccionados	65

Introducción

La energía nuclear constituye una de las principales formas de energía en la actualidad razón por la cual el desarrollo en investigaciones encaminadas en el tema son de gran importancia, en Colombia este es un campo poco estudiado ya que en el país no se han encontrado depósitos de Uranio (SGC, 2007) y tan solo en los últimos años se han retomado trabajos exploratorios a través del servicio geológico SGC (González et al., 2008) después de 30 años de cese de actividades.

En la exploración de este tipo de minerales, se emplean diversos métodos con el fin de obtener mediciones de radiactividad que permitan identificar áreas con posibilidades de albergar minerales radiactivos. Para obtener estas mediciones es utilizado, entre otras el espectrómetro de rayos gama el cual se constituye actualmente como la primera técnica de prospección de uranio aplicada mundialmente para el levantamiento de mapas geológicos, exploración mineral y monitoreo ambiental entre otros. Para el desarrollo de la presente investigación se han tomado datos capturados a partir de esta técnica, la cual permite establecer los contenidos de Uranio (U), Torio (Th) y Potasio (K), así como del conteo total de radiaciones por unidad de tiempo (cuentas por segundo) presente en las rocas y los cuales constituyen una fuente de radiactividad susceptible de ser medida en campo.

Estudios de mediciones de radiactividad en la exploración de uranio se han realizado en países como Siria. Asfahani, (2005) efectúa un análisis de los factores estadísticos de datos de espectrometría de aire, en la región de Al-Awabed donde se analizaron variables como U (Uranio), Torio (Th), potasio(K) y los cocientes entre U/Th, U/K. El objetivo principal fue la reinterpretación de datos de espectrometría de aire, para lo cual los datos fueron sometidos a estadística cualitativa y cuantitativa con el fin de concluir

respecto a la naturaleza y la importancia de la distribución de los radioelementos, este mismo autor en 2008, estudia las relaciones entre el uranio equivalente, el potasio y las unidades litológicas aflorantes en el área, el objetivo principal de este trabajo fue utilizar la espectrometría de datos aéreos con el fin de establecer el grado de removilización del uranio, a través de análisis de las concentraciones de uranio, torio y sus ratios. Asfahanti, (2009) describe que las estadísticas aplicadas incluyeron Mínimo, Máximo, Media y la desviación estándar (σ), y las variables estudiadas correspondieron a U, Th, K, Buccianti, (2009) presenta un estudio sobre los niveles naturales de radiactividad (K, Th, U y Rn en el área de Lake Cecita, sur de Italia) este estudio fue un intento de descubrir correlaciones con las características del suelo, los datos fueron analizados con procedimientos estadísticos gráficos y numéricos, se tuvo como objetivo establecer relaciones de los suelos y los contenidos de U, Th, K en el análisis se aplicaron pruebas de mediana para detectar presencia de diferencias significativas entre los diferentes datos analizados.

OODea, (2007) realizó una investigación sobre la distribución espacial de ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra y ^{40}K en los suelos del Valle Cronamuck, en Irlanda. El estudio tuvo como objetivo investigar la distribución de los radionúcleidos a una menor escala en una región de elevada radiactividad natural.

Estudios sobre el potencial de uranio en Australia fueron llevados a cabo por Kreuzer. et al, (2010), donde se muestra como los sistemas de información geográfica apoyaron los análisis de prospectividad. El objetivo fue producir modelos, a partir de la integración proveniente de una variedad de fuentes y de los parámetros que controlan la distribución espacial de los depósitos de uranio.

Autores como Longley, (2001), indican que los SIG realmente comenzaron a despegar en la década de 1980, época donde la exploración de minerales radiactivos en Colombia cesó, razón por la cual el tratamiento y análisis de la información capturada en el país y referente a estos minerales no ha contado con el apoyo de la Geomática la cual integra los medios para el tratamiento, análisis e interpretación, de la información geográfica lo que hace importante que mediante el procesamiento y análisis de los datos capturados por el Servicio Geológico Colombiano SGC anterior INGEOMINAS en el año 2010 se puedan mostrar las ventajas, alcances y capacidad que estos tienen para el manejo de

diferentes capas de información, grandes volúmenes de datos y la integración de los mismos, aspectos importantes en la exploración geológica.

Así mismo La Agencia Internacional de Energía Atómica IAEA, (2003) indica que el proceso de interpretación en la exploración de minerales radiactivos debe ser apoyado mediante el uso de sistemas de información geográfica con capacidades de procesamiento de datos ya que estos permiten integrar datos geológicos, espectrometría de rayos gamma, datos de campo, entre otros. Todos estos aspectos resaltan la importancia y necesidad de desarrollar metodologías que desde la Geomatica permitan modelar espacialmente las diferentes variables involucradas, integrando métodos de análisis espacial de datos, sistemas de información geográfica y sensores remotos.

Objetivos

Desarrollar una metodología para la identificación de áreas de interés en la exploración de minerales radiactivos en Colombia a través de la geomatica

Objetivos Específicos

- Analizar y seleccionar las variables a utilizar en la metodología
- Modelar y predecir las variables seleccionadas
- Identificar y espacializar las zonas de interés de acuerdo a las predicciones y modelamientos realizados.

1.MARCO TEORICO

A continuación se describen las variables que se analizaron en la ejecución del presente trabajo así como los conceptos de geoestadística, percepción remota, análisis y modelamiento espacial, aplicados para la determinación de zonas de interés para la exploración de minerales radiactivos.

1.1 Variables Geofísicas

La radiactividad se define como la propiedad que presentan los núcleos de algunas especies atómicas de desintegrarse espontáneamente, con emisión de partículas (α y β) y radiación electromagnética (rayos gamma) (Ford, 2001). Esta última es la más utilizada en la prospección radiométrica por su poder de penetración (IAEA, 2003). Además de ser la técnica utilizada en la exploración de minerales radiactivos. Babaglio, (2007) la define como un método para la determinación de la energía de la radiación gamma, la cual permite determinar cuantitativamente la abundancia de ciertos elementos radiactivos naturales como el uranio (U), el potasio (K) y el torio (Th), estos tres elementos son considerados como los radioelementos naturales siempre inestables y por lo tanto radioactivos, Casi toda la radiación gamma es emitida por el isótopo radiactivo del potasio, de peso atómico 40 y por elementos radiactivos de la serie de los elementos Uranio y Torio (Liendo, 2003). Estos 3 isótopos producen rayos gamma de suficiente energía e intensidad susceptibles de ser medidos en campo (IAEA, 2003) y corresponden a la información estudiada en el presente trabajo.

Oyarzún et al, (2002), destacan que en geología la espectrometría de rayos gamma es empleada para la determinación de cambios litológicos y la prospección de minerales radiactivos; gracias a que los distintos tipos de litología presentan concentraciones diferentes de los elementos radiactivos y por tanto permiten su diferenciación.

Las concentraciones o contenidos de los elementos radiactivos naturales en las rocas y menas se determinan por la relación entre el peso del elemento radiactivo y el peso de la roca. Dicha relación se expresa en:

- Potasio (K) en %: Porcentaje del elemento radiactivo por cada gramo de roca.
- Uranio (U) en ppm: partes de peso del elemento radiactivo por millón de partes de peso de rocas (ppm).
- Torio (Th) en ppm: partes de peso por millón de partes de peso de rocas (ppm).

A continuación se describen algunas de las características de los radioelementos naturales:

POTASIO: Es un elemento relativamente abundante en la naturaleza y debido a la presencia del radioisótopo K40 en el potasio natural, el cual es abundante en la corteza terrestre, hace que este elemento brinde un gran aporte a la radiactividad total de las rocas. Liendo, (2003) indica que en materiales tales como las arenas de cuarzo puro, piedra caliza y rocas ultramáficas serpentinizadas son pobres en los contenidos de este elemento, mientras que rocas arcillosas presentan contenidos altos de este.

URANIO: Este elemento aparece en la corteza terrestre como un elemento traza, se presenta en granitos y en sedimentos clásticos de origen granítico principalmente. El uranio, específicamente U234, es el objeto de la búsqueda radiométrica.

TORIO: Se presenta en concentraciones entre 3 y 30 ppm en los materiales de la corteza terrestre. La mayoría del torio contenido en los sedimentos puede ser transportado por la caolinita u otros minerales de la arcilla o en minerales pesados tales como zircón o monazita.

Un fenómeno importante a tener en cuenta en la exploración de este tipo de minerales son las cuentas de fondo que corresponden a un número de pulsaciones que emiten los contadores o medidores de radiactividad aun cuando no estén cerca de minerales uraníferos u otros materiales radioactivos. Son producidas por rayos cósmicos y por

pequeñas cantidades de elementos radioactivos que se hallan presentes en casi todo cuanto existe sobre la tierra.

Para el caso del presente trabajo las mediciones de radiactividad fueron realizadas sobre rocas sedimentarias las cuales contienen elementos radiactivos en cantidades variables. Por ejemplo las arenas limpias contienen menores cantidades mientras que las arcillas una mayor cantidad, algunos de los contenidos promedios de los tres radioelementos para ciertos tipos de rocas sedimentarias presentes en el área de estudio se resumen en la Tabla 1.1

Tabla 1.1. Concentración de Uranio (ppm), Torio (ppm) y Potasio (%) para algunas rocas sedimentarias.

Tipo de roca	K (%)	U (ppm)		Th (ppm)	
	Prom	Prom	Rango	Prom	Rango
Sedimentarias arenosas	1.4	1	0.5-2	3	2-6
Sedimentarias arcillosas	2.7	4	1-13	16	2-47
Calizas	0.3	2	1-10	2	

Fuente: Trujillo, (1993) en Liendo, (2003).

1.2 Geoestadística

Según Matheron, (1962), en Samper et al, (1996), la geoestadística es la aplicación de las variables regionalizadas a la estimación de procesos en fenómenos geológicos. Una variable regionalizada es aquella que se encuentra distribuida en el espacio de forma que presenta una estructura espacial de correlación.

Journel & Huijbregts, (1978) en Cuador, (2002) la definen como una rama de la estadística que trata fenómenos espaciales. Myers, (1987) en Díaz, (2002), indican que su interés primordial es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos y la definen como una rama de la estadística aplicada que se especializa en el análisis y la modelación de la variabilidad espacial en ciencias de la tierra.

En geología específicamente en trabajos de exploración mineral se emplean datos tomados en distintos lugares requiriendo el desarrollo de modelaciones y predicciones

que muestren la dependencia entre las numerosas variables que se capturan en campo y en el laboratorio. Giraldo, (2002) manifiesta que dicha modelación corresponde con la predicción espacial. Nicolás, (2004) define esta predicción como un proceso de estimación de valores de una cantidad fijada como objetivo en lugares no visitados y ya que la geoestadística tiene como fin estudiar fenómenos caracterizarlos puede ser aplicada a varios aspectos entre ellos la predicción.

Giraldo (2002), indica que cuando el objetivo es hacer predicción, la geoestadística opera en dos etapas. La primera corresponde al análisis estructural, en la cual se describe la correlación entre puntos en el espacio, en esta primera etapa se selecciona el modelo geoestadístico y se especifica el tipo de consideraciones o hipótesis sobre la variabilidad de un fenómeno. Nicolás (2004), indica que en esta etapa es donde se toman decisiones tales como la definición de la variable, estimación del variograma entre otros. Díaz, (2002) establece que aquí es donde se estima y modela una función que refleje la correlación espacial de la variable regionalizada a partir de la adopción razonada de la hipótesis más adecuada acerca de su variabilidad. Se usan funciones como el semivariograma el cual mide el grado de disimilaridad de una variable en función de la distancia de separación (Clark, 1979 en García, 2006) constituyéndose en una herramienta para la caracterización de esta correlación espacial.

La segunda etapa consiste en realizar predicción en sitios de muestreo. Allí es utilizada la técnica conocida como kriging el cual es un método interpolador Geoestadístico, que presenta dos propiedades básicas: Hacer que la suma de errores tienda a cero, y que el cuadrado de las desviaciones sea mínimo (Narváez, 2002). Su objetivo es estimar el valor de la variable definida, para un punto x_0 que no ha sido considerado anteriormente, realizando una suma ponderada sobre todos los sectores que conforman la zona de estudio, tomando los vecinos más cercanos al punto de interés x ; existen diversos tipos de kriging para la realización de estas predicciones. En la Tabla 1.2 se resumen las características y propiedades de estos.

Tabla 1.2. Tipos de predictores Kriging y sus propiedades.

Según la forma del estimador		Según el soporte de la medición de los datos	Kriging paramétrico y no Paramétrico	
Lineales:	Simple Ordinario Universal Residual	Puntual	Paramétrico:	Multigaussiano Disyuntivo Lognormal
No Lineales:	Disyuntivo Indicador Probabilístico	En Bloques	No Paramétrico:	Simple Ordinario Universal Residual Indicador Probabilístico

Fuente: (Giraldo, 2002).

1.3 Análisis y Modelamiento Espacial

La Geomática constituye un apoyo tecnológico que está facilitando el desarrollo, cada vez más extendido, de aplicaciones, en las que se analiza información multitemática georreferenciada (Chica-Olmo et al., 2002; Cassard et al., 2008; citados en Carranza, 2009); así como la utilizada en la exploración geológica donde se cuenta con múltiples capas de información convirtiéndose en herramienta fundamental para la generación de nuevos productos cartográficos a través de los diferentes métodos de análisis espacial que pueden realizarse ya que estos incluyen gran cantidad de transformaciones, manipulaciones, y métodos que pueden aplicarse a datos geográficos para darles un valor agregado, apoyar decisiones, y descubrir patrones (Longley, 2001). Así mismo este autor indica que el análisis espacial es el proceso por el cual los datos en bruto se transforman en información útil, en la búsqueda de los descubrimientos científicos, o de decisiones más eficaces.

Existen diferentes funciones de análisis y modelado descritas en Longley, 2001 las cuales permiten obtener información útil a partir de datos geográficos, como los analizados en el presente trabajo. Estas funciones son descritas a continuación:

CONSULTAS: Son las más básicas operaciones de análisis, En estas no se producen cambios en la base de datos, ni se generan nuevos datos. Las consultas son una de las maneras más eficientes y útiles para obtener información de un, porqué. Mediante estas, se puede dar análisis al lugar, la relación entre diferentes datos y realizar comparaciones

TRANSFORMACIONES: Son métodos sencillos de análisis del espacio de conjuntos de datos. Permiten la obtención de nuevos conjuntos de datos a partir de la combinación y comparación de los datos y de esta manera poder obtener nuevo conocimiento.

RESÚMENES DESCRIPTIVOS: a través de estos es posible capturar la esencia de un conjunto de datos en uno o dos números. Ellos son el espacio equivalente de los estadísticos descriptivos de uso común en análisis estadísticos, incluyendo la media y desviación estándar

TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN: son de carácter normativo, diseñado para seleccionar los lugares ideales para objetos dados bajo ciertos criterios bien definidos.

PRUEBA DE HIPÓTESIS: Se centran en el proceso de razonar a partir de los resultados de una muestra limitada para hacer generalizaciones sobre una población entera. Nos permiten, por ejemplo, determinar si un patrón de puntos podría haber surgido por casualidad, en base a la información de una muestra.

MODELADO: Este se refiere a un término empleado cuando los distintos pasos de análisis se combinan en secuencias complejas. Según Longley, (2001) se divide en:

- **Modelo Estático:** Describe el uso de una secuencia para alcanzar algún objetivo definido, tales como la medición de la idoneidad de lugares para el desarrollo, o su sensibilidad a la contaminación o a procesos de erosión y acumulación de sustancias entre otros.
- **Modelado dinámico:** Utiliza el SIG para emular procesos físicos reales o sociales que operan en el paisaje geográfico.

Un esquema muy seguido para ordenar las funciones de los SIG es el modelado cartográfico. Yeung, (2002) lo define como la unión entre operaciones que funcionan dentro de diferentes capas en una secuencia lógica para solucionar problemas espaciales, estas operaciones han sido llamadas álgebra de mapas la cuales originalmente fueron propuestas por Tomlin, (1991) en Yeung, (2002) este autor distingue cuatro grupos básicos de operadores que se pueden combinar mediante expresiones algebraicas para componer modelos complejos. Estas operaciones se describen a continuación.

Operaciones locales Consisten en (examinan los datos celda por celda), Operaciones focales (compara los valores de cada celda con los de las celdas vecinas), Operaciones globales (producen resultados para todos los datos, como la media aritmética) y operaciones zonales (operan con bloques de celdas contiguas que tienen el mismo valor). Una modificación ligera de esta tipología es la realizada por Berry, (1993) en Yeung (2002) en ella distingue:

OPERACIONES DE RECLASIFICACIÓN: Mediante las cuales se generan nuevos mapas a partir de la asignación de valores a las categorías existentes, en función de su tamaño, localización, forma, orientación u otras propiedades

OPERACIONES DE SUPERPOSICIÓN: Producen nuevos mapas en los que el valor de cada píxel es el resultado de aplicar alguna función a los valores de los píxeles de la misma localización de dos o más mapas

OPERACIONES DE VECINDAD: Consisten en procedimientos que asignan valores a una localización en función de los valores vecinos a ese punto.

Este análisis espacial que se realiza a los datos generados en los estudios geocientíficos ha consistido tradicionalmente en la superposición de los datos analógicos recopilados en forma de mapas en una mesa para realizar un posterior análisis visual (Bonham, 1996). Con el uso de los sistemas de información geográfica se ha logrado un sistema más eficaz para la construcción de estos análisis (Rigol, 2011) y por tanto la obtención de información más precisa y útil para diferentes usuarios.

1.4 Sensores Remotos

Moreno M, indica que la información obtenida por los satélites brinda una nueva forma de analizar y comprender los fenómenos que dominan la dinámica de la tierra, a su vez las técnicas digitales y el tratamiento de este tipo de imágenes permiten crear productos de una gran utilidad en el proceso de interpretación en Geociencias, ya que apoyan la elaboración de cartografía geológica, estudios de tectónica de placas, erosión, geomorfología, geología estructural, geobotánica entre otros, permitiendo la obtención de una gran cantidad de información a partir de las imágenes satelitales, las cuales son sometidas a numerosos procesos que realzan ciertas características permitiendo extraer mayor información que la que se obtiene con una imagen cruda a estas técnicas se le denomina procesamiento digital.

El procesamiento digital se define como el conjunto de métodos y técnicas orientado a la manipulación, análisis cualitativo y cuantitativo de las imágenes digitales, su corrección, mejoramiento, transformación y/o clasificación temática con el fin de generar información útil sobre objetos, áreas y fenómenos, sin estar en contacto con ellos, y con el fin de mejorar conocimiento sobre los recursos naturales de la tierra y medio ambiente (Posada, 2008; Gis Development, 2007; CCRS, 2003). En él se incluye una amplia gama de procedimientos; dentro de los cuales se encuentra los realces y mejoramientos que son aplicados para realzar contrastes y características particulares de las imágenes para optimizar el proceso de Interpretación visual, estos procesos están orientados a mejorar la resolución de las imágenes por tal razón se encuentran divididos en tres grupos: mejoramientos espaciales, radiométricos y espectrales.

Dentro de este último grupo se encuentran los denominados cocientes o relaciones entre bandas los cuales han sido documentadas en múltiples publicaciones relacionadas con la exploración geológica, siendo una de las técnicas de procesamiento más útil en estos estudios; Normalmente consiste en dividir el nivel digital de cada pixel en una banda por el nivel digital de otra banda ubicado exactamente en la misma posición. De este cociente se obtiene un nuevo conjunto de números que pueden ser presentados en diversas escalas, dependiendo de la aplicación que se le esté dando.

En la Tabla 1.3 se resumen algunas relaciones de banda utilizados en el procesamiento de imágenes Landsat

Tabla 1.3. Ratios y aplicaciones en imágenes Landsat

RATIOS	APLICACIONES
1/2, 1/4, 3/4	Caracterización de rocas y suelos
1/2 o 2/1	Sedimentos suspendidos en el agua
1/2 o 2/1	Contenidos de óxidos de hierro en rocas
3/1, 3/2, 4/1, 4/2	Vegetación y cuerpos de agua

Fuente: Avery & Berlin (1992) en Aber JS, (2013). Modificado por Vargas, S. (2014)

Según Aber JS,(2013) estos ratios o cocientes tienen el efecto de la eliminación de sombras y variaciones de iluminación causados por la pendiente de tal manera, se pueden comparar las firmas espectrales directamente, independientemente de las condiciones de iluminación diferentes. En geología una de las aplicaciones más importantes es la identificación de minerales, a continuación se describen algunos de los cocientes que han sido utilizados para la identificación de estos.

RATIO B3/B1: En la banda 3 se observan todos los procesos electrónicos de catión Fe^{3+} Y en la banda1 la absorción de los procesos electrónicos de dicho catión; dando así una razón alta en términos de reflectancia de las zonas de oxidación.

RATIO B3/B7: En la Banda 3 hay una buena reflectancia para las arcillas y en la Banda 7 la absorción de estas debido al enlace Al-Oh, este ratio Ha sido utilizado para identificación de zonas Argilicas

RATIO B7/B5: Ratio que resalta las concentraciones de hidróxidos; dichos minerales están presentes dentro las rocas alteradas hidrotermalmente como por ejemplo la alunita, valores altos de reflectancia en este ratio pueden indicar también presencia de piroxenos y carbonatos en la imagen (Sabins, 1999).

RATIO B5/B7: Este ratio indica, mediante un mayor brillo en la imagen, la presencia de rocas alteradas. La firma espectral de los minerales de hierro (goethita, hematites y

jarosita), con baja reflectancia en el azul y alta en el rojo permite distinguir las rocas alteradas con máxima concentración en hierro (Arezo M, 2012).

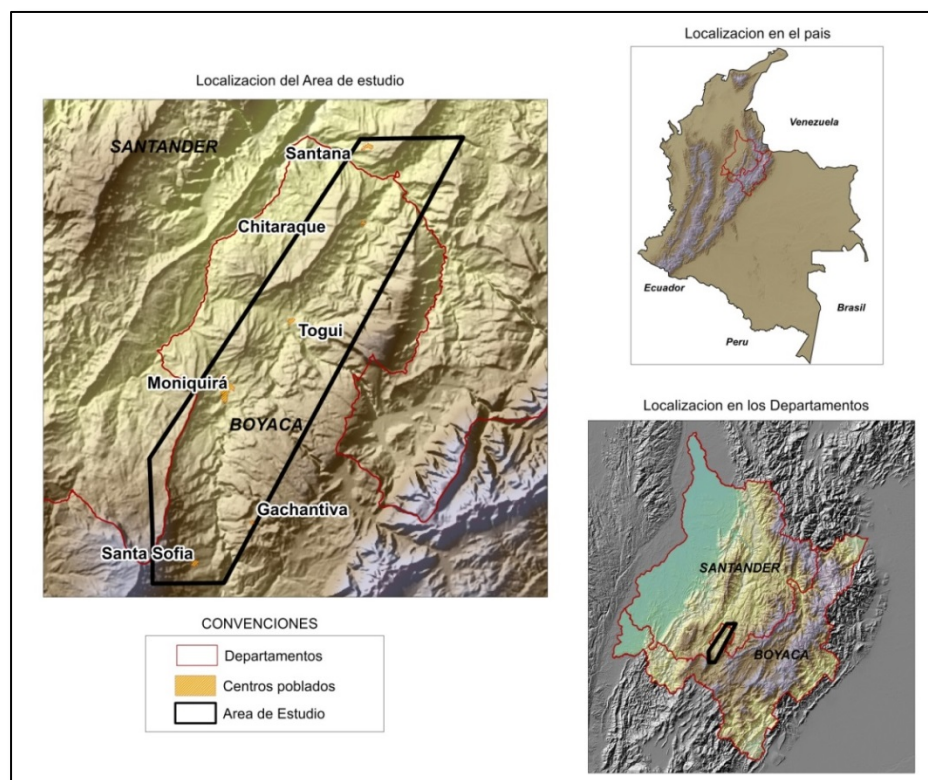
2.MATERIALES Y METODOS

A continuación se describen los materiales utilizados así como los procesos realizados con el fin de emplear la información específica en el formato correcto para el procesamiento final y obtención de los modelos y relaciones encontradas en la ejecución de la presente investigación.

2.1 Localización del área de estudio

El estudio se realizó con información proveniente de un área de aproximadamente 580 Km². ubicada en la Cordillera Oriental, en los departamentos de Boyacá y Santander (Figura 2-1)

Figura 2-1.Localización área de estudio



2.2 Datos Geofísicos

Los datos corresponden a cuatro campañas llevadas a cabo por el servicio geológico colombiano SGC (González et al, 2010). Cuyo objetivo fue localizar valores importantes de uranio. Esta información se encuentra accesible al público a través del sistema de información para el inventario, catalogación, valoración y administración de la información técnica científica SICAT del Servicio Geológico Colombiano.

La información de campo fue tomada usando la metodología recomendada por la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos consignada en el folleto “prospecting for uranium”, (González et al, 2010) la cual recomienda tener en cuenta aspectos como la geología, topografía general del área entre otros. Los datos fueron capturados utilizando un Gamma Espectrómetro GS512 y un scintilometro SPP2 (Figura 2-2)

Figura 2-2. Equipos utilizados en la exploración de minerales radiactivos para la captura de las variables analizadas.



Fuente: González et al, 2010

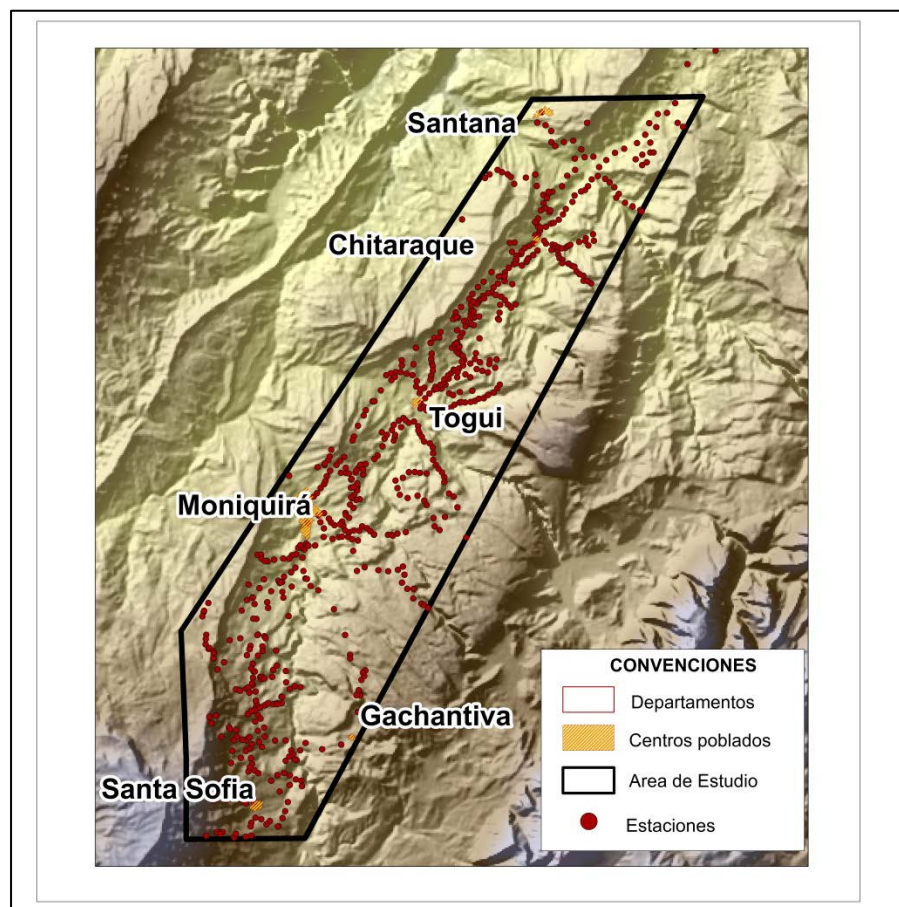
Las lecturas de rayos gamma se realizaron cada 300m aproximadamente, en total se cuentan con 780 puntos geográficos donde existe información de Conteo Total, Uranio, Torio, Potasio, Geología, Tipo de Roca, Unidad Geológica entre otros (Figura 2-3), la información recopilada a través del SICAT fue clasificada analizada y estructurada con el

fin de construir tablas de datos que permitieran realizar las diferentes consultas, el tratamiento de la información así como el desarrollo de la metodología planteada. La información fue vectorizada colocada en formato geodatabase, Excel, txt entre otros, toda la información recopilada fue transformada del sistema Datum Bogotá como originalmente fue tomada al Sistema Magna Sirgas.

El procesamiento y análisis de estos datos se realizó con el software R 2.13 donde se generaron los mapas de predicción para cada una de las variables analizadas posteriormente estos fueron exportados a formato *img* para su posterior visualización y análisis en el software ArcGis

Figura 2-3. Estaciones de captura de información.

Estos datos corresponden a la información capturada en el año 2010 por SGC-anterior INGEOMINAS



2.3 Características Geológicas

El área de estudio está cubierta por rocas sedimentarias del Cretácico y Jurásico, las cuales se mencionan y describen en las planchas 170 Vélez, 171 Duitama, 151 Charala, publicadas por INGEOMINAS (1979, 1967 y 1985 respectivamente).

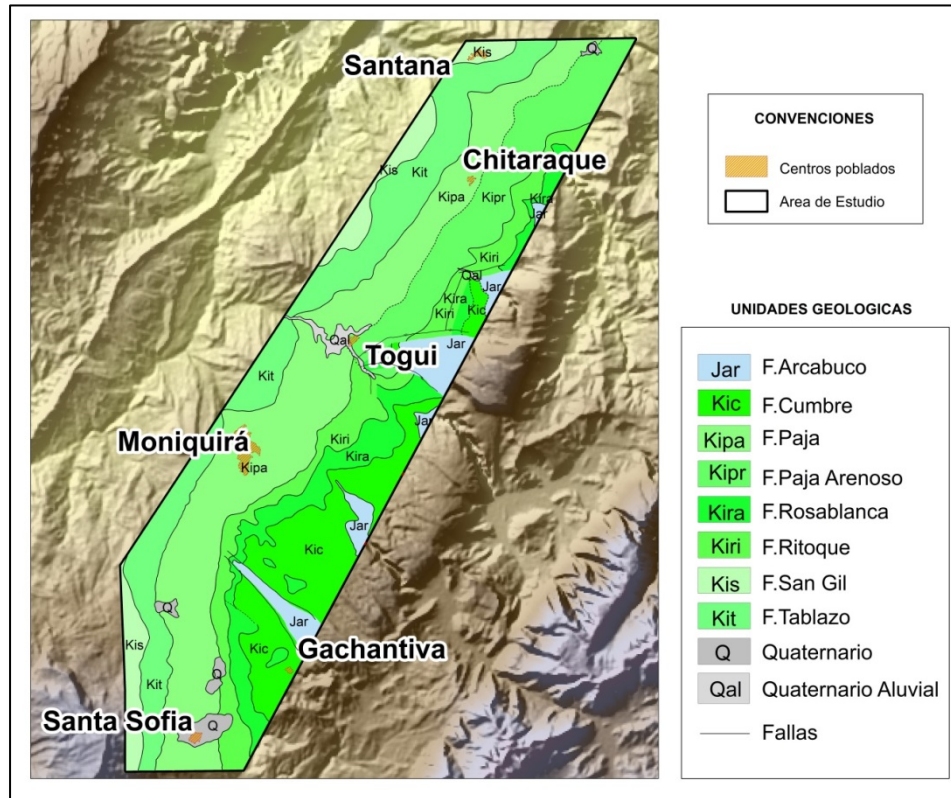
Las características principales de las unidades geológicas aflorantes en el área son descritas en González et al, (2010) y resumidas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio

UNIDAD GEOLÓGICA	LITOLOGÍA PREDOMINANTE
Formación Arcabuco (Jar)	Areniscas cuarzosas de grano fino
Formación cumbre (Kic)	Areniscas grises oscuras a verdes que se alternan con shales negros, con delgados niveles de pirita
Formación Rosablanca (Kira)	Constituida por calizas grises oscuras, macizas, en capas gruesas desde 0.5 hasta 3 m de espesor (que forman paredes verticales), fosilíferas, con niveles arcillosos frecuentes.
Formación Ritoque (Kiri)	Limolitas grises micáceas sericiticas, que por meteorización dan tonos rojizos y se alternan con areniscas de grano fino, arcillolitas y calizas lumaquéllicas
Formación Paja (Kipa)	Secuencia litológica de shales negros con abundante materia orgánica de color gris oscuro a negro, ligeramente calcáreos y micáceos, localmente con nódulos y concreciones calcáreas, con costras de óxidos de hierro y abundantes nódulos piritosos
Formación Tablazo (Kit)	Calizas grises oscuras, algo arcillosas, en estratos hasta 1 m de espesor con venas de calcita que cortan la estratificación, lutitas grises oscuras a negras con nódulos ferruginosos e intercalaciones de limolitas, calizas negras fosilíferas con capas delgadas de margas y lutitas claras y negras
Cuaternario (Q, Qal)	En el área se encuentran depósitos de terraza, aluviales y de derrubio

Las unidades geológicas así como su localización en el área de estudio se muestran en la Figura 2-4.

Figura 2-4: Unidades geológicas aflorantes en el área de estudio.



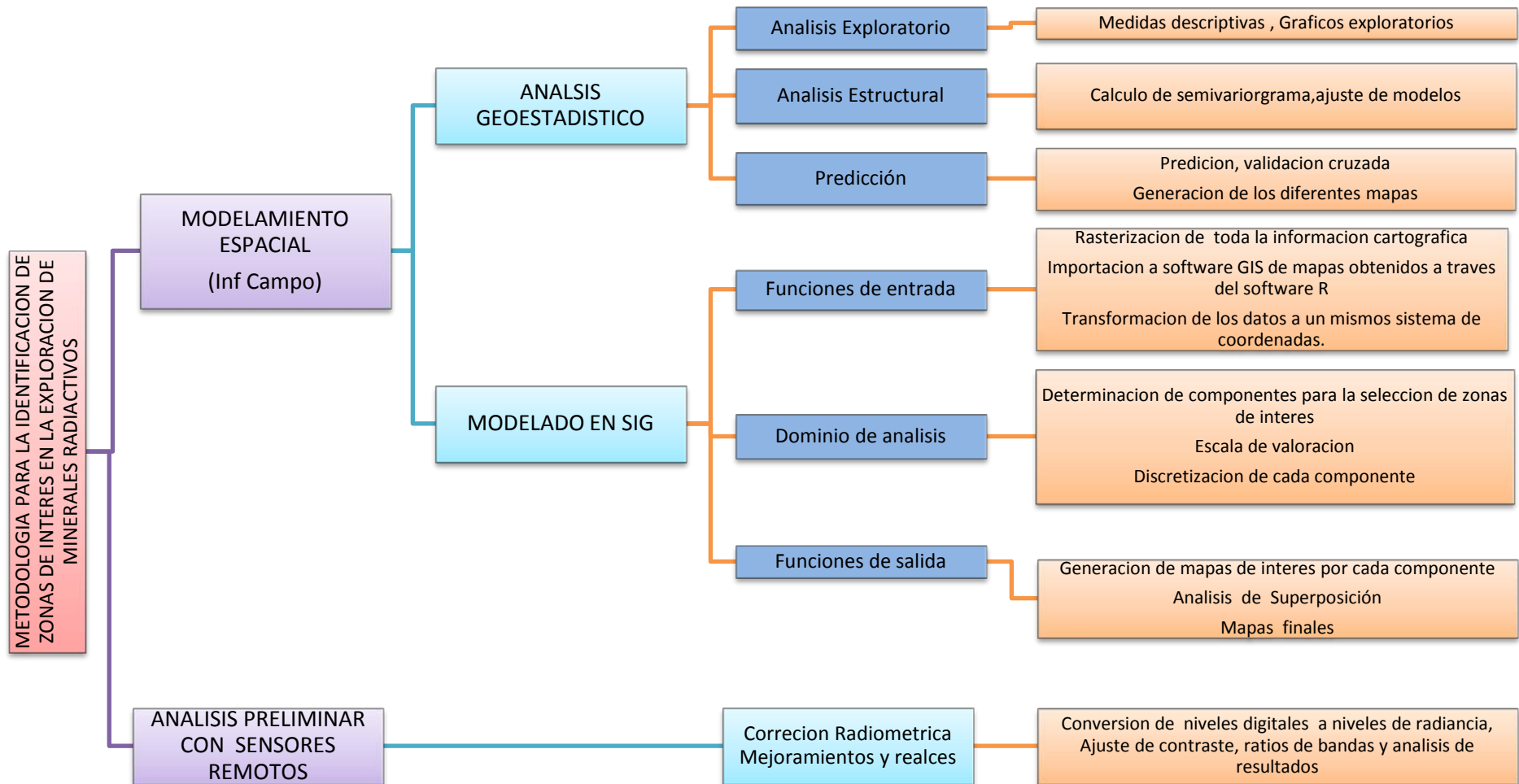
2.4 Sensores remotos

Se realizó un análisis preliminar a través de sensores remotos empleando una imagen Landsat 7 ETM de enero del año 2003, con resolución espacial de 30 m compuesta por 7 bandas, 6 bandas multiespectrales, que cubren las regiones del visible hasta el infrarrojo medio, una banda pancromática con resolución de 15 m y una banda termal; Para la visualización y posterior procesamiento de esta imagen se utilizaron los software ERDAS 11 y ENVI 4.5.

2.5 Metodología

La metodología propuesta planteó dos grandes procesos: el modelamiento espacial que incluye el análisis Geoestadístico y el modelamiento bajo un sistema de información geográfica y el análisis preliminar a través de sensores remotos. En la Figura 2-5 se observa el esquema metodológico propuesto.

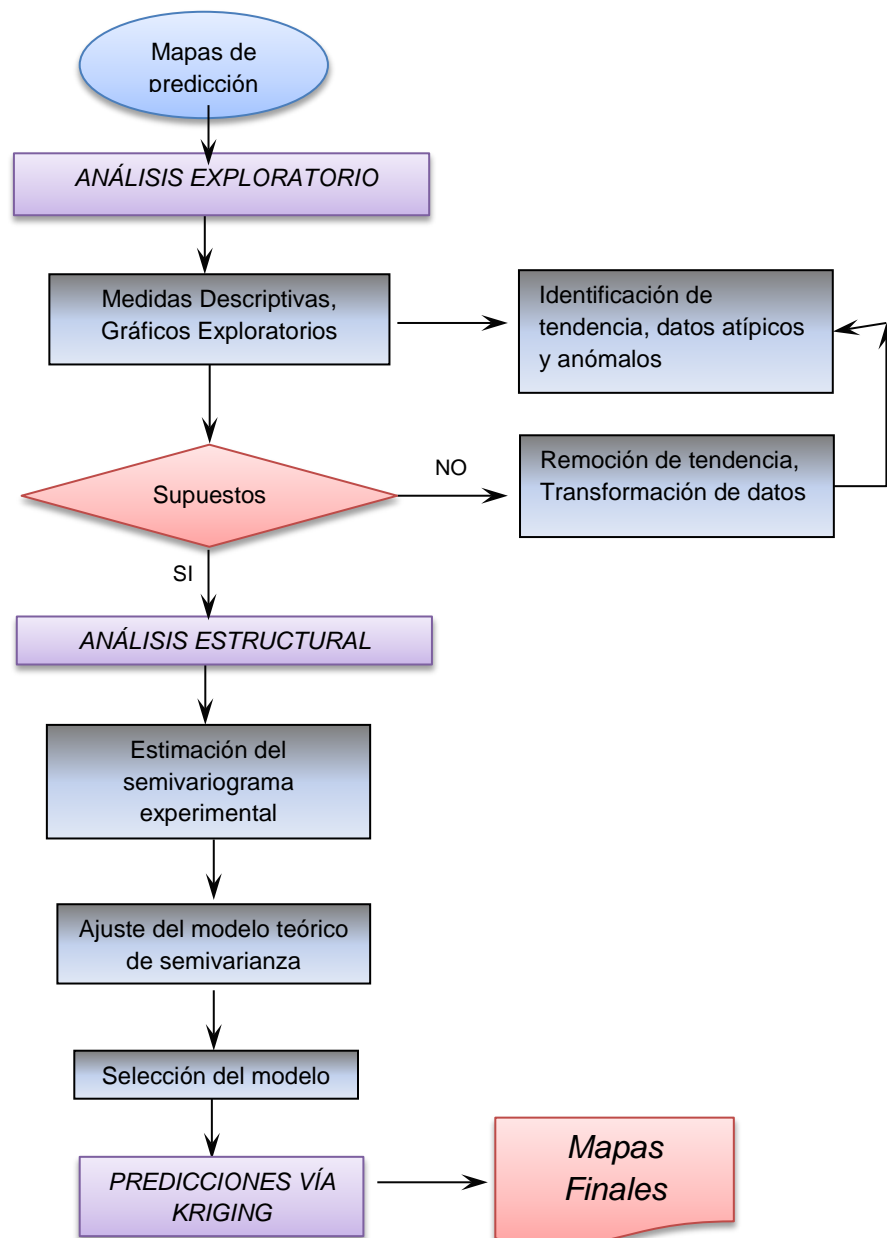
Figura 2-5. Diagrama Metodológico general



2.5.1 Análisis Geoestadístico.

En esta fase se siguieron las etapas realizadas en un proceso estadístico el cual está compuesto de tres ciclos (Díaz, 2002 y Giraldo, 2002): (a) Análisis exploratorio (b) Análisis estructural y (c) Predicciones. En la figura tal se muestra el esquema metodológico seguido para la obtención de los mapas de predicción para cada una de las variables. (Figura 2-6).

Figura 2-6. Esquema General del análisis Geoestadístico.



2.5.1.1 Análisis Exploratorio

Esta etapa se basa en técnicas estadísticas convencionales que permiten obtener un conjunto de información, desconocida sobre la muestra bajo estudio, Díaz, (2002). Indica que esta etapa es importante para realizar “correctamente” un análisis geoestadístico.

En esta fase se analizaron las medidas de forma las cuales hablan sobre la homogeneidad del conjunto de datos y la concentración de la distribución del atributo del conjunto analizado.

En este análisis se identificaron los valores extremos, el promedio, la mediana, la desviación estándar, el coeficiente de variación, gráficos exploratorios como histogramas, diagrama de tallos y hojas que tienen el propósito de identificar localización, variabilidad, forma, observaciones extremas, e identificación de tendencias en el valor promedio de la región, el análisis se realizó con el software R 2.15 donde se obtuvieron las medidas de localización, dispersión, forma y los principales estadígrafos para establecer el comportamiento de los datos.

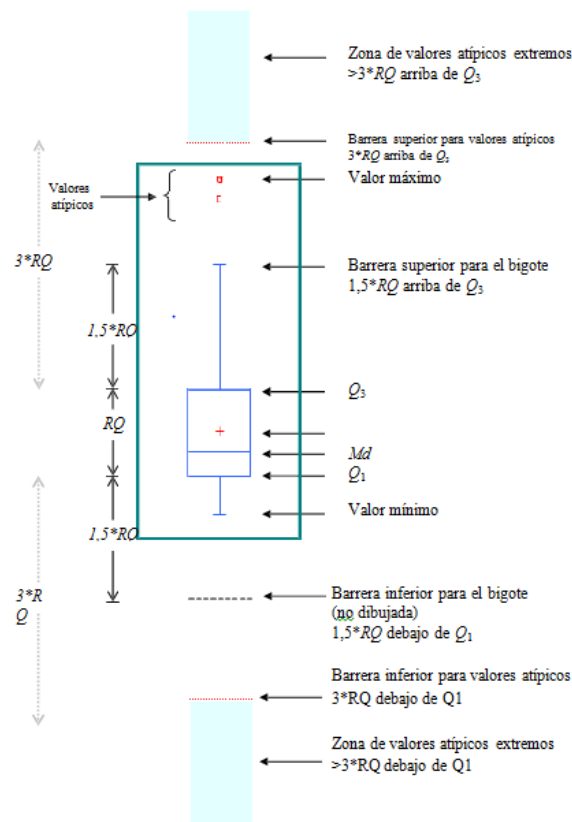
Transformación de datos: Cuando se analizan datos medidos por una variable cuantitativa continua, las pruebas estadísticas de estimación y contraste frecuentemente empleadas se basan en suponer que se ha obtenido una muestra aleatoria de una distribución de probabilidad de tipo normal. Pero en muchas ocasiones esta situación no se presenta por tal razón los datos pueden transformarse y conseguir disminuir la variabilidad de los datos.

Datos atípicos y anómalos: Los datos atípicos están definidos como aquellos que presentan un registro mayor o menor de lo esperado el cual es detectado por tener un residuo que es un valor “inusual”, muy grande o muy pequeño en relación con la distribución asociada a estos. Salvador, F; Gargallo, P. (2003) indican que este tipo de casos no pueden ser caracterizados como benéficos o problemáticos sino que deben ser contemplados en el contexto del análisis y debe evaluarse el tipo de información que pueden proporcionar. Para su identificación se empleó una medida de dispersión no

sensible a datos atípicos como la distancia intercuantil RQ en la Figura 2-7 se muestra su determinación a través del diagrama de caja.

Matriz de diagramas de dispersión: Estos permiten analizar, de forma simultánea, las relaciones existentes entre un grupo de variables cuantitativas. Consiste en representar los diagramas de dispersión para todas las combinaciones de las variables analizadas. Y ver si se presenta algún tipo de tendencia espacial, Z vs X , Z vs Y .

Figura 2-7. Cálculo de valores atípicos a partir de un diagrama de caja



Fuente: León, G

2.5.1.2 Análisis estructural de los datos

En esta etapa se determinó la dependencia espacial entre los datos medidos de cada una de las variables de estudio, inicialmente se calculó el semivariograma experimental: el cual es una herramienta que permite determinar las características de variabilidad y

correlación espacial del fenómeno a estudiar (Chica, 1987), y de cómo la variable cambia de una localización a otra (Lamorey y Jacobsom, 1995; Issaks & Co., 1999).

Se calcularon los semivariograma medio, global u "omnidireccional" los cuales dan una idea inicial de la variabilidad espacial de los datos, e identifican la dirección de máxima o mínima variabilidad así como la anisotropía del fenómeno. Posteriormente se ajustaron varios modelos teóricos estos modelos cumplieron con ciertas condiciones, como ser "definido positivo" o de "tipo positivo" (Deutsch, 1994; Myers, 1992; Cressie y Grondona, 1992) con el fin de no encontrar varianzas negativas carentes de sentido (Armstrong y Carignan, 1997). El ajuste de los modelos teóricos se realizó en forma manual para posteriormente mediante métodos como el mínimo cuadrados y máxima verosimilitud encontrar el mejor ajuste al semivariograma. Finalmente, se obtuvieron uno o varios modelos de variogramas y cada uno de los parámetros asociados con el modelo de mejor ajuste; es decir, la Pepita, la Meseta, el Rango, la Relación Pepita-Meseta.

Mínimos cuadrados ordinarios: este procedimiento es utilizado para realizar el ajuste de un modelo teórico de semivariograma de forma que la curva ajustada sea lo más cercana a los puntos del semivariograma experimental.

Máxima verosimilitud: Este método permite estimar los parámetros de un modelo probabilísticos a los coeficientes de un modelo matemáticos, de tal manera que se han lo más probables a partir de los datos obtenidos, (Cressie, 1991) en Valvuela C, (2006) indica que este método asume que los residuos están normalmente distribuidos y son independientes y que las semivarianzas estimadas poseen igual varianza.

2.5.1.3 Predicción de los datos

Una vez se determinó el modelo de semivarianza se realizaron las predicciones para cada variable. La predicción se realizó mediante el Kriging. El cual es una técnica encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción.

Para el caso del presente estudio se tuvo en cuenta que cuando la variable presenta algún tipo de tendencia y fue necesario realizar una regresión lineal o cuadrática en términos de las coordenadas geográficas y el kriging fue aplicado a los residuales de la regresión el tipo de kriging utilizado fue el universal para el caso de las variables originales que no fueron sometidas a ninguna transformación o que no presentaban algún tipo de tendencia el kriging utilizado fue el ordinario.

2.5.1.4 Validación cruzada

Para evaluar la bondad de ajuste de los modelos de semivariograma elegidos con respecto a los datos muestrales y por ende de las predicciones hechas con kriging. Se realizó la validación cruzada este método consiste en excluir la observación de uno de los puntos muestrales y con los $n-1$ valores restantes y el modelo de semivarianza escogido predecir via kriging el valor de la variable, Este análisis permite comparar los datos muestreados con los datos estimados mediante el Kriging siendo un indicador de la confiabilidad de los mismos.

Una vez se obtuvieron los mapas de predicción en base a las variables geofísicas capturadas en la exploración se procedió a realizar el modelamiento espacial y el análisis preliminar con sensores remotos para así obtener las zonas de mayor interés, los métodos empleados se describen a continuación.

2.5.2 Modelado en sistemas de información geográfica

El modelamiento se ejecutó en formato raster realizando los procedimientos propuestos por Giordano et al. (1994) los cuales se dividen en tres categorías (Funciones De entrada, Dominio de análisis, funciones de salida)

2.5.2.1 Funciones de entrada

Incluye las funciones que preparan y estructuran los datos raster para su uso en SIG, tales como reestructuración, compilación y edición, esta etapa se basó en la Generación de la base cartográfica de la zona de estudio, Recopilación de Información cartográfica, temática y estadística, Proyección de toda la información a un mismo sistema de coordenadas (Magna Origen Bogotá) finalmente rasterización la base de datos original.

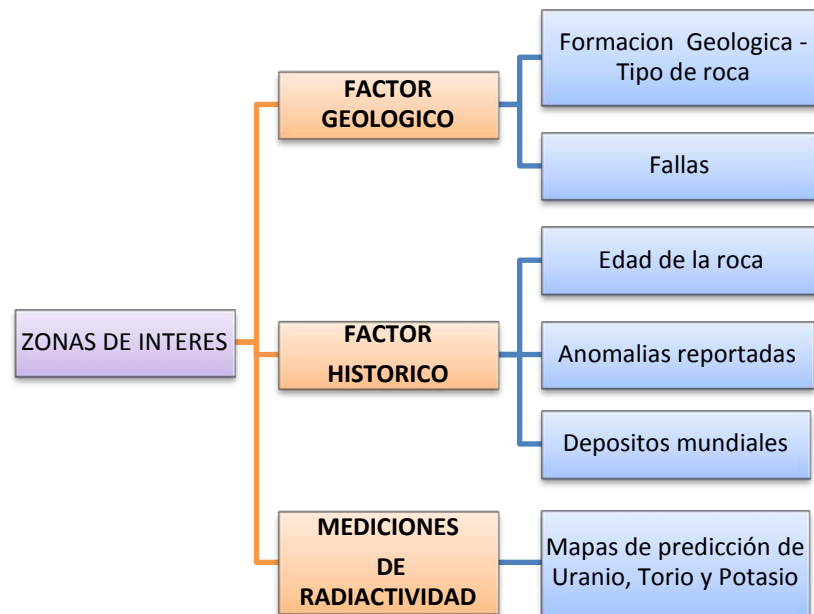
2.5.2.2 Dominio de análisis:

Incluye todas las funciones que derivaran relaciones espaciales implícitas en la fuente de datos, tales como operaciones lógicas, aritméticas, de superposición y geométricas.

En esta etapa se determinó el análisis de superposición como el más adecuado para la determinación de zonas de interés ya que este es una operación esencial en aplicaciones que van desde detección de cambios, selección de sitio, estudios de idoneidad, clasificaciones multivariadas y evaluación de la precisión (Morain & Baros 1996).

En este tipo de análisis se combinan múltiples capas raster en una gran variedad de formas y es la base de lo que se conoce como modelamiento cartográfico el cual es la unión entre las operaciones que funcionan en diferentes capas raster en una secuencia lógica para solucionar problemas espaciales (Yeung, 2002). A partir de este concepto se definieron las diferentes capas de acuerdo a la información disponible que pudieran ser útil en el modelamiento posteriormente se construyó el modelo cartográfico el cual se muestra en la Figura 2-8.

Figura 2-8. Modelo cartográfico propuesto para la determinación de zonas de interés en la exploración de minerales radiactivos



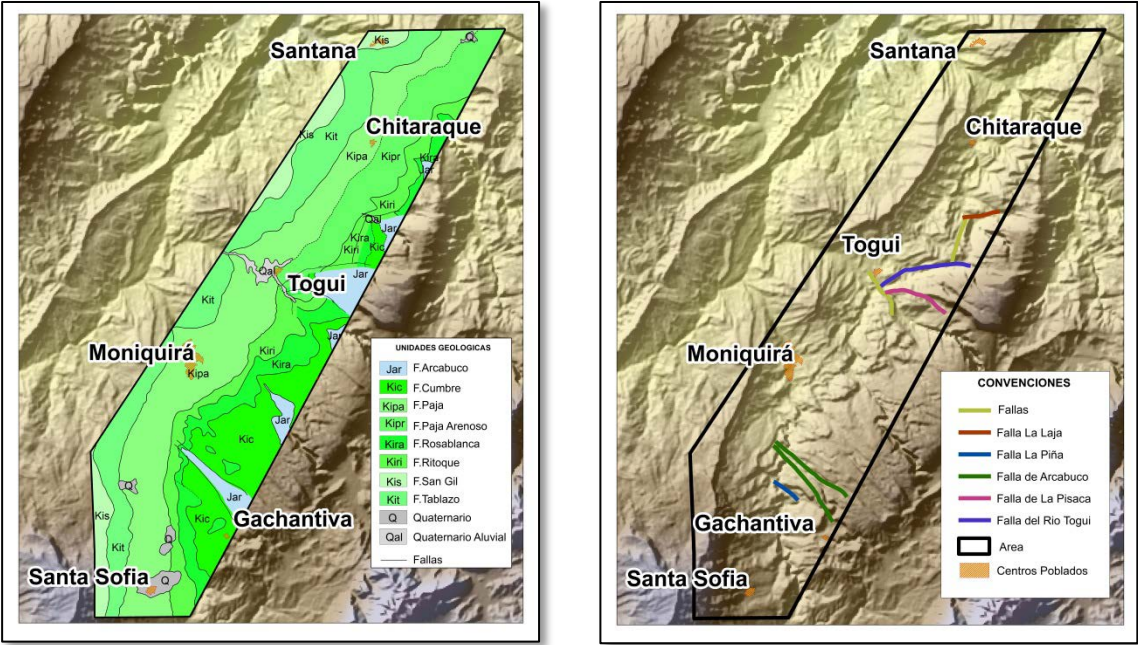
2.5.2.2.1 CAPAS DE ENTRADA DEL MODELO

De acuerdo a la información obtenida en la exploración se definieron tres componentes para la determinación de zonas de interés los cuales se describen a continuación:

- **FACTOR GEOLOGICO**

Para este componente se tomó como base el mapa geológico a escala 1:25000 realizado por el Servicio Geológico Colombiano anterior INGEOMINAS. Dentro de este se escogieron dos aspectos a considerar Formación geológica- tipo de roca y Fallas geológicas (Figura 2-9).

Figura 2-9.Condiciones geológicas del área de estudio
Izq. Unidades geológicas del área. Der. Fallas y estructuras geológicas del área.



• FACTORES HISTÓRICOS

En este aspecto se tuvo en cuenta la edad de la roca (Tabla 2.2) y las anomalías reportadas en rocas del mismo tipo que las presentes en el área de estudio.

Tabla 2.2.Edad de las rocas en el área de estudio

FORMACIÓN	EDAD	
FORMACION ARCABUCO	JURASICO	
FORMACION CUMBRE	CRETACEO	Berriasiano al Valanginiano.
FORMACION ROSABLANCA		Valanginiano Superior
FORMACION RITOQUE		Hauteriviano inferior
FORMACION PAJA		Hauteriviano – Aptiano superior.
FORMACION TABLAZO		Aptiano
CUATERNARIO	CUATERNARIO	

En cuanto a las Anomalías reportadas y presencia de minerales radiactivos en el área se tomó como base la información de la exploración de uranio llevado a cabo en los años 80 en Colombia donde se reportan numerosas localidades que presentaron valores alto de radiactividad específicamente en la región de Moniquirá -Togüí, en el departamento de Boyacá. En la Tabla 2.3 se resumen las anomalías reportadas en cada formación presente en el área.

Tabla 2.3. Anomalías reportadas en el área de estudio.

FORMACION	ANOMALIAS REPORTADAS
CUATERNARIO	NO PRESENTA
FORMACION SAN GIL	NO PRESENTA
FORMACION TABLAZO	NO PRESENTA
FORMACION PAJA	SE REPORTA
MIEMBRO ARENOSO DE LA FORMACION PAJA	NO PRESENTA
FORMACION RITOQUE	NO PRESENTA
FORMACION ROSABLANCA	NO PRESENTA
FORMACION CUMBRE	NO PRESENTA
FORMACION ARCABUCO	NO PRESENTA

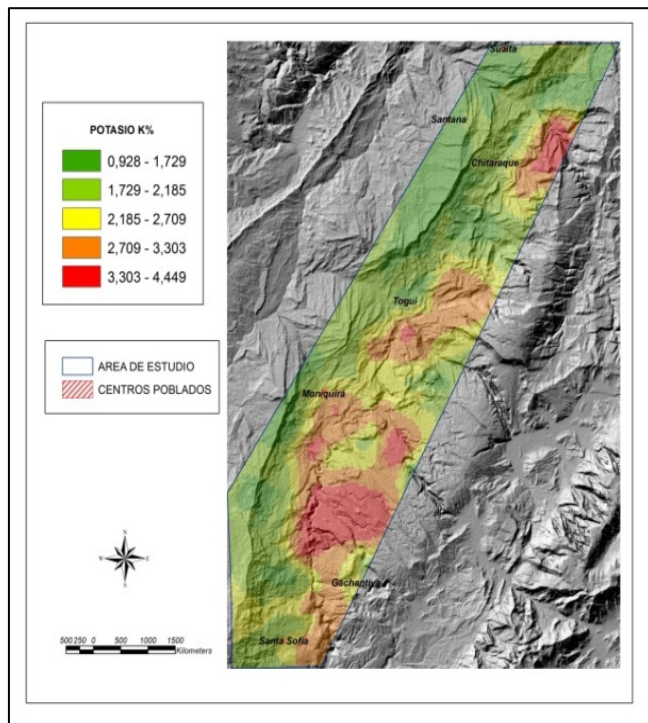
• MEDICIONES DE RADIATIVIDAD

Se tomaron los mapas de predicción que fueron obtenidos a partir del análisis geo estadístico (Figura 2-10) y algunas condiciones indicadas por la Comisión de Energía Atómica como las “cuenta de fondo”, y el número de veces en que la cuenta de fondo es superada.

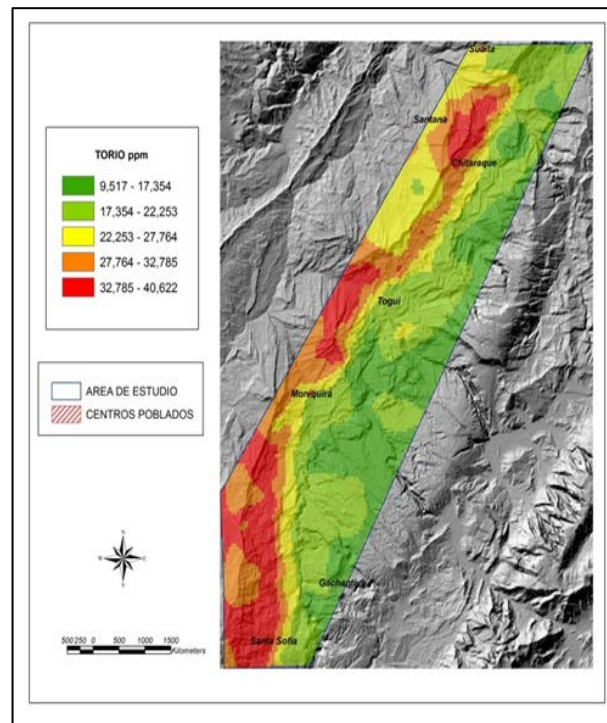
Luego de definir cada uno de los aspectos dentro de cada componente se identificó la secuencia de las operaciones a seguir (Berry, 1987; Tomlin, 1990). Indica que este proceso se conoce como algebra de mapas el cual consiste en secuenciar las operaciones de manera similar a soluciones algebraicas con ecuaciones para determinar interrogantes.

Figura 2-10. Mapas de predicción de las variables analizadas.

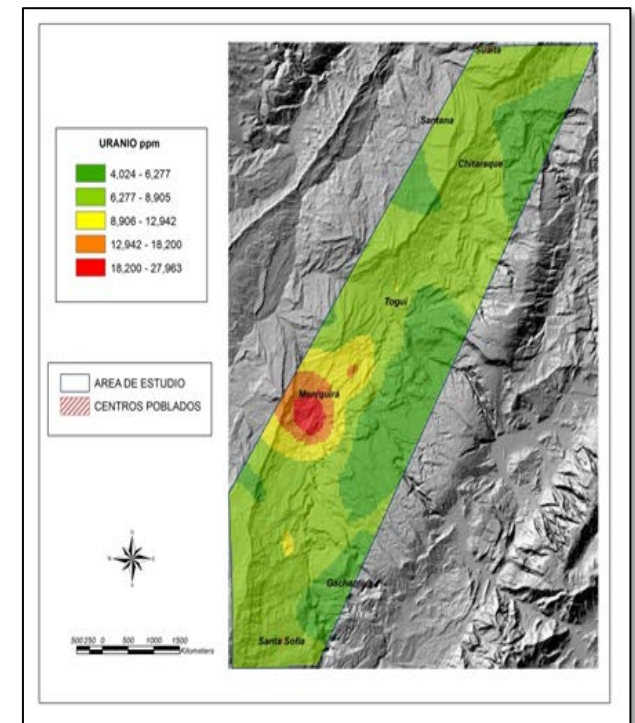
MAPA DE PREDICCIÓN
POTASIO



MAPA DE PREDICCIÓN
TORIO



MAPA DE PREDICCIÓN
URANIO



2.5.2.2.2 ANÁLISIS DE SUPERPOSICIÓN

Como uno de los fines del presente trabajo es identificar las zonas de mayor interés cada capa de entrada fue reclasificada en tres categorías: Alta, Media, Baja las cuales indican las posibilidades de encontrar minerales radiactivos la categorización se realizó mediante el análisis de información de cada aspecto lo cual se conoce como análisis de superposición.

En la superposición de ráster, cada celda de cada capa hace referencia a la misma ubicación geográfica, es decir que se combinan las características de varias capas en una sola. Generalmente, se asignan valores numéricos a cada característica, lo que le permite combinar matemáticamente las capas y asignar un nuevo valor a cada celda en la capa de salida así (Tabla 2.4)

Tabla 2.4. Escala de Valoración.

VALOR NUMERICO	CALIFICACION
1	BAJO
2	MEDIO
3	ALTO

A continuación se describe como se asignó un nuevo valor a cada componente del modelo en base a la información y a la posibilidad de presentar minerales radiactivos.

COMPONENTE GEOLOGICO

- Formación geológica- Tipo de roca

En el área afloran rocas sedimentarias, Garzón, L (1978) indica que las concentraciones de uranio torio y potasio en estas rocas son en general inferiores a la de las rocas ígneas y metamórficas tomando esta consideración se realizó una revisión de literatura con el fin de identificar de acuerdo a las rocas presentes en cada formación geológica aflorante cuáles son las de mayor probabilidad de concentrar cada una de las variables analizadas.

Estas características se resumieron en las siguientes tablas:

Tabla 2.5. Principales consideraciones sobre la ocurrencia del Torio

TORIO
<p>La mayoría del torio contenido en sedimentos puede ser transportado por la caolinita u otros minerales de arcilla (Liendo P, 2003)</p> <p>El ión Th^{4+} se encuentra muy a menudo adsorbido en los minerales Arcillosos debido a su gran radio atómico. En general se observa un aumento del torio con el aumento del contenido de aluminio en los minerales arcillosos. (Garzón, 1978)</p> <p>Shlumberger técnicas en Venezuela, (1980) Indica la presencia en</p> <ul style="list-style-type: none"> - En minerales arcillosos por adsorción - En minerales pesados como la monacita <p>En sedimentos residuales que quedan luego del potasio y del uranio y que son eliminados por erosión (Cuney M, 2012)</p> <p>-Depósitos de placer que corresponden a las arenas enriquecidas con minerales pesados</p> <p>-Guijarros de cuarzo y conglomerados (por ejemplo Witwatersrand y Blind River-Elliot Lake depósitos)</p>

Tabla 2.6. Principales consideraciones sobre la ocurrencia del Potasio

POTASIO
<p>Arenas de cuarzo y piedra caliza son pobres en potasio (Liendo P, 2003)</p> <p>El potasio es uno de los elementos más móviles, pero su movilidad puede disminuir si es absorbido por las arcillas en ambientes naturales.</p> <p>Shlumberger técnicas en Venezuela (1980) indican que puede haber dos ocurrencias</p> <p>1. sedimentos detríticos</p> <ul style="list-style-type: none"> -En arcillas en general -En sedimentos inmaduros (feldespatos y micas) -En arcillas micáceas <p>2. Sedimentos químicos</p> <p>En calizas originadas en algas</p> <p>En evaporitas</p>

Tabla 2.7.Principales consideraciones sobre la ocurrencia de los radioelementos Uranio

URANIO
<p>El Uranio se presenta en depósitos en rocas sedimentarias se destacan los depósitos en areniscas, conglomerados de cuarzo, rocas fosfáticas y shales negros de origen marino (INGEOMINAS, 2007)</p> <p>Gerasimovskii, V. (1957) indica que Ciertas rocas sedimentarias, muestran tenores (enriquecidos) como el caso de lignitos, ciertos fosfatos marinos y los depósitos de este tipo de rocas se han identificado en shales negros carbonosos, calizas y areniscas con sustancias orgánicas, así como en fosforitas marinas.</p> <p>Se puede encontrar en lutitas negras (Cuney M, 2012)</p>

En base a las características antes mencionadas se procedió a asignar un valor numérico a cada característica determinada en el modelo (Tabla 2.8)

Tabla 2.8. Discretización del componente formación geológica- tipo de roca para las variables analizadas.

UNIDAD GEOLÓGICA	ROCA PREDOMINANTE	URANIO	TORIO	POTASIO
Formación Arcabuco (Jar)	Areniscas cuarzosas	3	3	1
Formación San Gil (Jar)	Lutitas y limolitas negras, con intercalaciones de areniscas y calizas de pocos metros de espesor	3	2	1
Formación cumbre (Kic)	Areniscas grises oscuras a verdes que se alternan con shales negros, con delgados niveles de pirita	3	3	2
Formación Rosablanca (Kira)	Constituida por calizas grises oscuras, macizas, en capas gruesas desde 0.5 hasta 3 m de espesor (que forman paredes verticales), fosilíferas, con niveles arcillosos frecuentes.	2	1	2
Formación Ritoque (Kiri)	Limolitas grises micáceas sericiticas, que por meteorización dan tonos rojizos y se alternan con areniscas de grano fino, arcillolitas y calizas lumaquéllicas	2	2	2
Formación Paja (Kipa)	Secuencia litológica de shales negros con abundante materia orgánica de color gris oscuro a negro, ligeramente calcáreos y micáceos, localmente con nódulos y concreciones calcáreas, con costras de óxidos de hierro y abundantes nódulos piritosos.	3	2	2

UNIDAD GEOLÓGICA	ROCA PREDOMINANTE	URANIO	TORIO	POTASIO
Formación Tablazo (Kit)	Calizas grises oscuras, algo arcillosas, en estratos hasta 1 m de espesor con venas de calcita que cortan la estratificación, lutitas grises oscuras a negras con nódulos ferruginosos e intercalaciones de limolitas, calizas negras fosilíferas con capas delgadas de margas y lutitas claras y negras.	2	1	2
Cuatrnario (Q, Qal)	En el área se encuentran depósitos de terraza, aluviales y de derrubio	1	3	1

FACTORES GLOBALES

Edad de la roca: Para este componente se identificaron las edades donde se han encontrado depósitos de uranio, torio y potasio a nivel mundial tomando como premisa las siguientes recomendaciones dadas por la comisión de energía atómica.

Las exploraciones de Uranio probablemente tendrán mejor éxito si se realizan en aquellas zonas donde:

- 1) Se haya encontrado antes el metal.
- 2) En lugares que presenten condiciones geológicas semejantes a donde se hayan encontrado Uranio anteriormente.

Por tal razón se identificaron están condiciones para las variables analizadas las cuales se describen a continuación

Uranio: Los yacimientos de uranio no se distribuyen uniformemente en las diferentes épocas geológicas. No existen depósitos económicamente explotables en el Arcaico (los terrenos precámbricos más antiguos de 2.500 millones de años). De 3 millones de toneladas de los recursos conocidos hasta hoy, el 48 % se encuentran en terrenos del Proterozoico (terrenos precámbricos que datan entre 2.500 millones y 550 millones de años). Menos del 7 % se sitúan entre el Cámbrico y el Jurásico) y casi el 45 % de estos recursos se encuentran en terrenos más recientes (más jóvenes que 230 millones de años). (Cuney, 2013)

Torio: Son conocidos en areniscas, conglomerados y arcosas del Proterozoico a finales del Terciario. Algunos de estos placeres puede contener hasta varios miles de ppm Th, pero la mayoría tienen menos de 100 ppm. (Cuney, 2012) en base a esto se pondero la edad de las unidades geológicas aflorantes

Potasio: Gonzalez L, (2012) indica que a nivel mundial los depósitos de potasio se encuentran en formaciones del paleozoico y el terciario así mismo este autor menciona que en Colombia los hallazgos están circunscritos a rocas de edad cretácica.

En base a las características anteriormente nombradas se calificó este componente en el modelo (Tabla 2.9)

Tabla 2.9. Calificación factor Edad

FORMACION	EDAD	CATEGORIZACION URANIO	CATEGORIZACION TORIO	CATEGORIZACION POTASIO
FORMACIÓN ARCABUCO	JURASICO	1	2	1
FORMACIÓN CUMBRE	CRETACEO	3	2	3
FORMACIÓN ROSABLANCA		3	2	3
FORMACIÓN RITOQUE		3	2	3
FORMACIÓN PAJA		3	2	3
FORMACIÓN TABLAZO		3	2	3
CUATERNARIO	CUATERNARIO	3	1	1

ANOMALÍAS REPORTADAS

En la Tabla 2.10 se observa la calificación realizada a partir de las anomalías reportadas en el área

Tabla 2.10. Anomalías reportadas en el área de estudio

FORMACIONES	ANOMALIAS REPORTADAS	CALIFICACION
CUATERNARIO	NO SE REPORTA	1
FORMACION SAN GIL	NO SE REPORTA	1
FORMACION TABLAZO	NO SE REPORTA	1
FORMACION PAJA	SE REPORTA	3
MIEMBRO ARENOSO DE LA FORMACION PAJA	NO SE REPORTA	3
FORMACION RITOQUE	NO SE REPORTA	1
FORMACION ROSABLANCA	NO SE REPORTA	1
FORMACION CUMBRE	NO SE REPORTA	1
FORMACION ARCABUCO	NO SE REPORTA	1

MEDICIONES DE RADIATIVIDAD

Se tomaron los mapas de predicción que fueron obtenidos a partir del análisis geo estadístico, en este componente se tuvieron en cuenta tres aspectos: El promedio del elemento en la corteza terrestre, las cuentas de fondo que corresponden a un número de pulsaciones que emiten los contadores aun cuando no estén cerca de minerales uraníferos u otros materiales radioactivos son producidas por rayos cósmicos y por pequeñas cantidades de elementos radioactivos que se hallan presentes en casi todo cuanto existe sobre la tierra y el promedio de las lecturas es una indicación clara de esta cuenta de fondo para la región. (U.S. Atomic Energy Commission.1954) y por último los valores que superen cuatro veces la cuenta de fondo, ya que la U.s Atomic Energy comisión indica que cuando se presenten este tipo de valores deben tomarse muestras de ella y considerarse como zona de interés.

La categorización en base a estas características se resume en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Rango de contenidos de Uranio, Torio y Potasio para las diferentes variables.

	URANIO (ppm)		TORIO (ppm)	POTASIO %	CALIFICACION
	U	U sin atípicos			
Promedio en la corteza terrestre	4		10	2,27	BAJA
Cuenta de fondo	8	5.94	25.18	2.4	MEDIA
Relación de Importancia Comisión de Energía atómica	18	23,76	100,72	8,54	ALTA

2.5.2.3 Funciones de salida

Por último se emplearon las funciones de salida ya que ellas presentan los resultados de las funciones de análisis en una forma adecuada para la comunicación y solución de problemas espaciales, tales como mapas, gráficas y reportes estadísticos.

Este procedimiento aplica tanto para datos raster como vector y pueden emplearse como una solución inmediata a un problema espacial o como una entrada para análisis espaciales futuros. A continuación se muestran las capas obtenidas para cada una de las variables analizadas (Tabla 2.12)

Tabla 2.12. Capas obtenidas a partir de la discretización dada. (Variables Uranio y Torio)

CAPA	URANIO	TORIO
EDAD		
FALLAS		
FORMACION GEOLOGICA-TIPO DE ROCA		

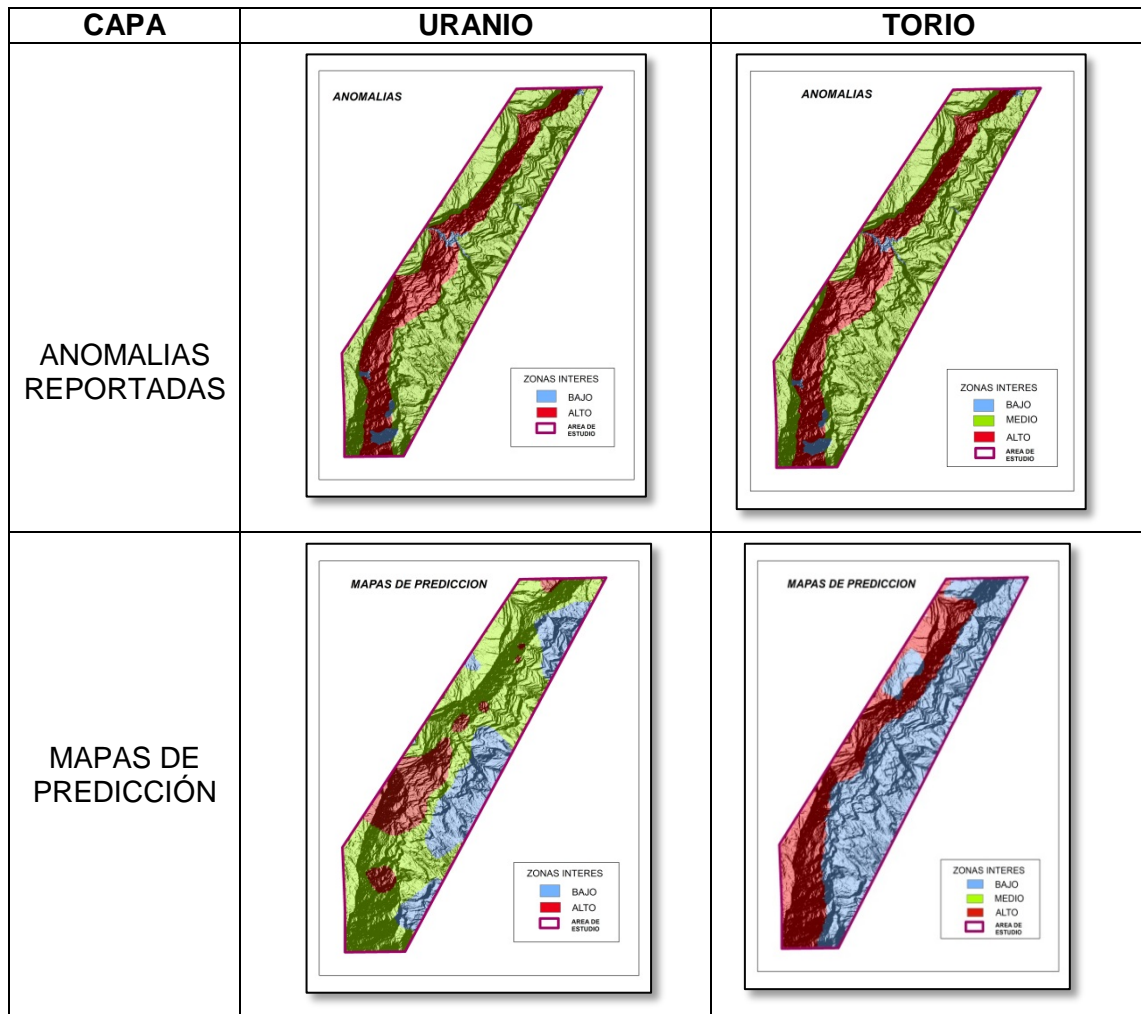
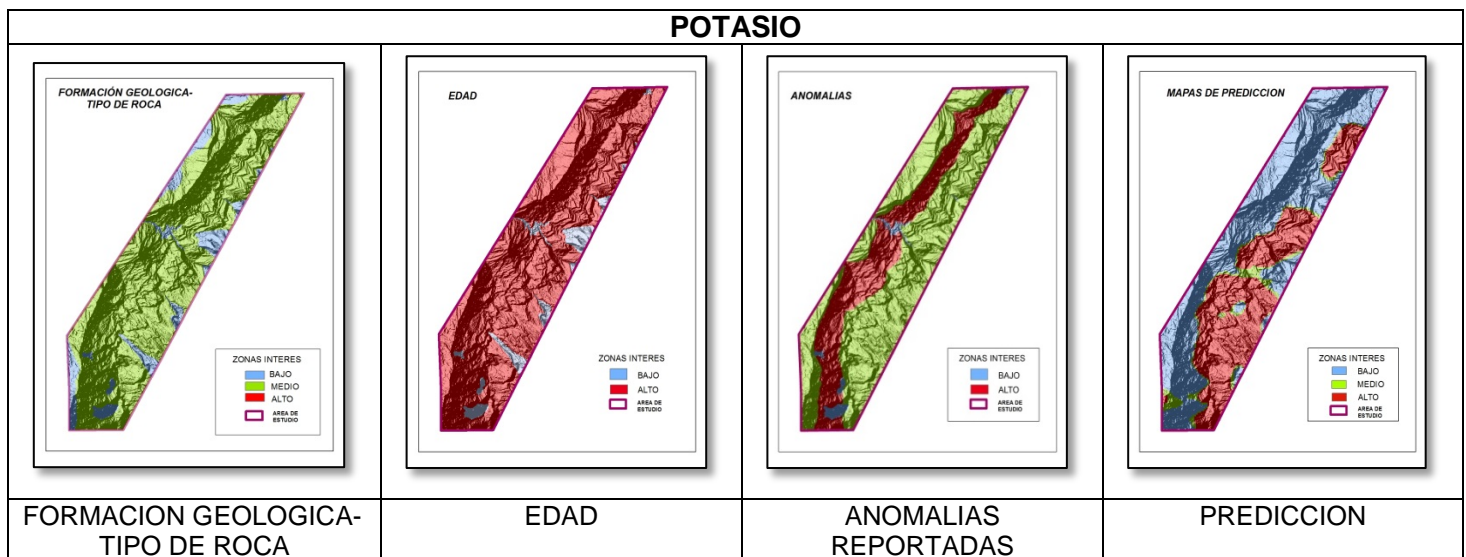


Tabla 2.13. Capas obtenidas a partir de la calificación dada. (Variable Potasio)



2.5.3 Análisis preliminar con sensores remotos

En una imagen Landsat los datos se encuentran en niveles digitales, los cuales no representan de manera directa la respuesta espectral de la superficie terrestre por tal razón no es conveniente obtener índices espectrales o ratios usando estos valores "crudos". Estos cocientes entre bandas fueron desarrollados para trabajar con valores de reflectancia espectral de la superficie terrestre. Por lo tanto, el primer procesamiento realizado fue convertir los valores niveles digitales en valores de reflectancia. (Figura 2-11) Este proceso se realizó en dos etapas:

- 1) Conversión de ND a Radiancia (esta etapa se conoce como calibración radiométrica)
- 2) Conversión de Radiancia a Reflectancia Aparente (es decir, el cálculo de la reflectancia en el sensor)

Como el objetivo era aplicar diversos ratios que resaltaran la presencia de ciertas características mineralógicas del área se tuvo en cuenta que estos ratios tienden a acentuar los patrones de ruido, por lo que se realizó la corrección de atmosférica la cual es un proceso importante antes de su estimación (Alber J,S 2013). Esta corrección se basa en el supuesto de que la banda 4 (Infrarrojo Cercano) sufre dispersión atmosférica mínima y al realizar esta corrección las otras bandas se ajustan al mismo valor mínimo de esta banda. (Figura 2-11)

Para el cálculo de estos ratios se utilizó el software ENVI 4.5 este posee la funcionalidad de eliminar visualmente la vegetación de una imagen, lo que puede ofrecer diversas aplicaciones, como la interpretación geológica, la detección e identificación de objetos ocultos en urbanismo entre otras.

Por último se aplicaron varios ratios que permitieron resaltar ciertas características en el área los ratios aplicados fueron:

- $TM3/TM1, TM4/TM1, TM3/TM7, TM3/TM4$

Figura 2-11. Correcciones realizadas imagen Landsat

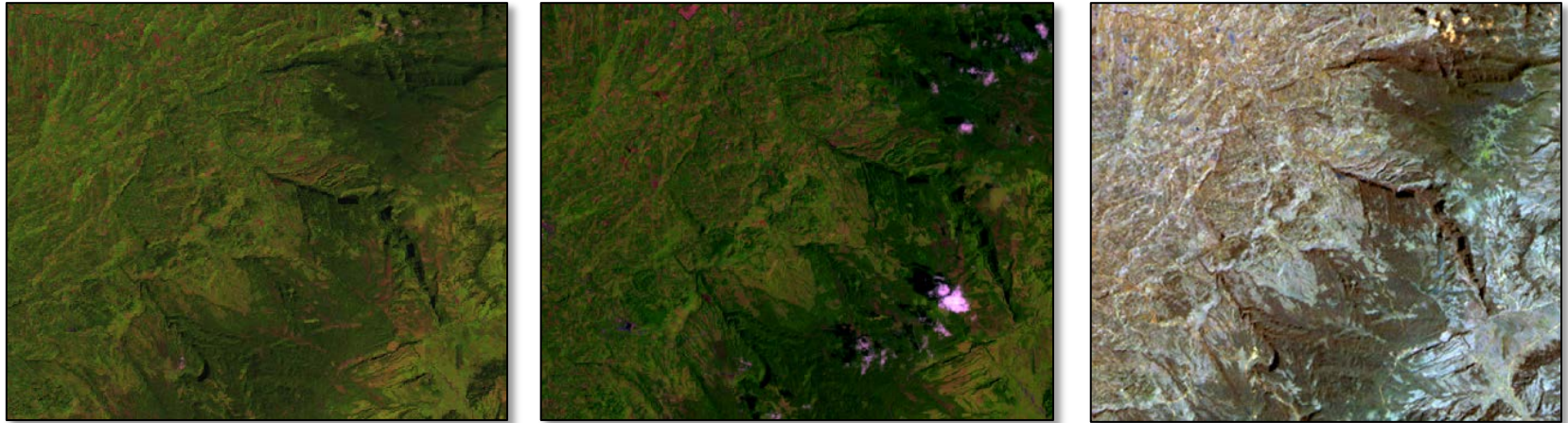


Imagen original en ND

Imagen en NR

Imagen con SV

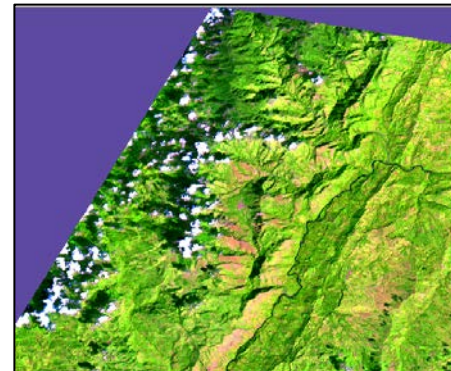
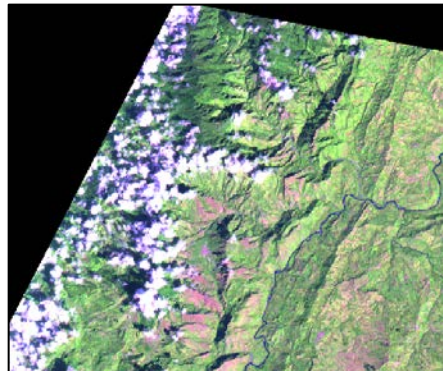


Imagen sin reducción de neblina

Imagen con filtro Haze Reduction

ND: Nivel Digital; NR: Niveles de reflectancia; SV: Supresión de vegetación

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 3.1 muestra los principales parámetros estadísticos, de las variables analizadas donde se puede sugerir el comportamiento regional algo discontinuo para las concentraciones de los tres radioelementos, K, U y Th. Esto se refleja tanto en la diferencia entre sus valores extremos como en los mayores valores en las medidas de dispersión para los variables uranio y torio

De igual manera se observa que los valores de tendencia central muestran los máximos para las concentraciones de Th mientras que para el K presenta los mínimos, esto puede indicar un mayor aporte de los isotopos de torio en el área, el cual también presenta diferencias entre sus valores extremos, y una menor variabilidad que en el caso del uranio y el potasio.

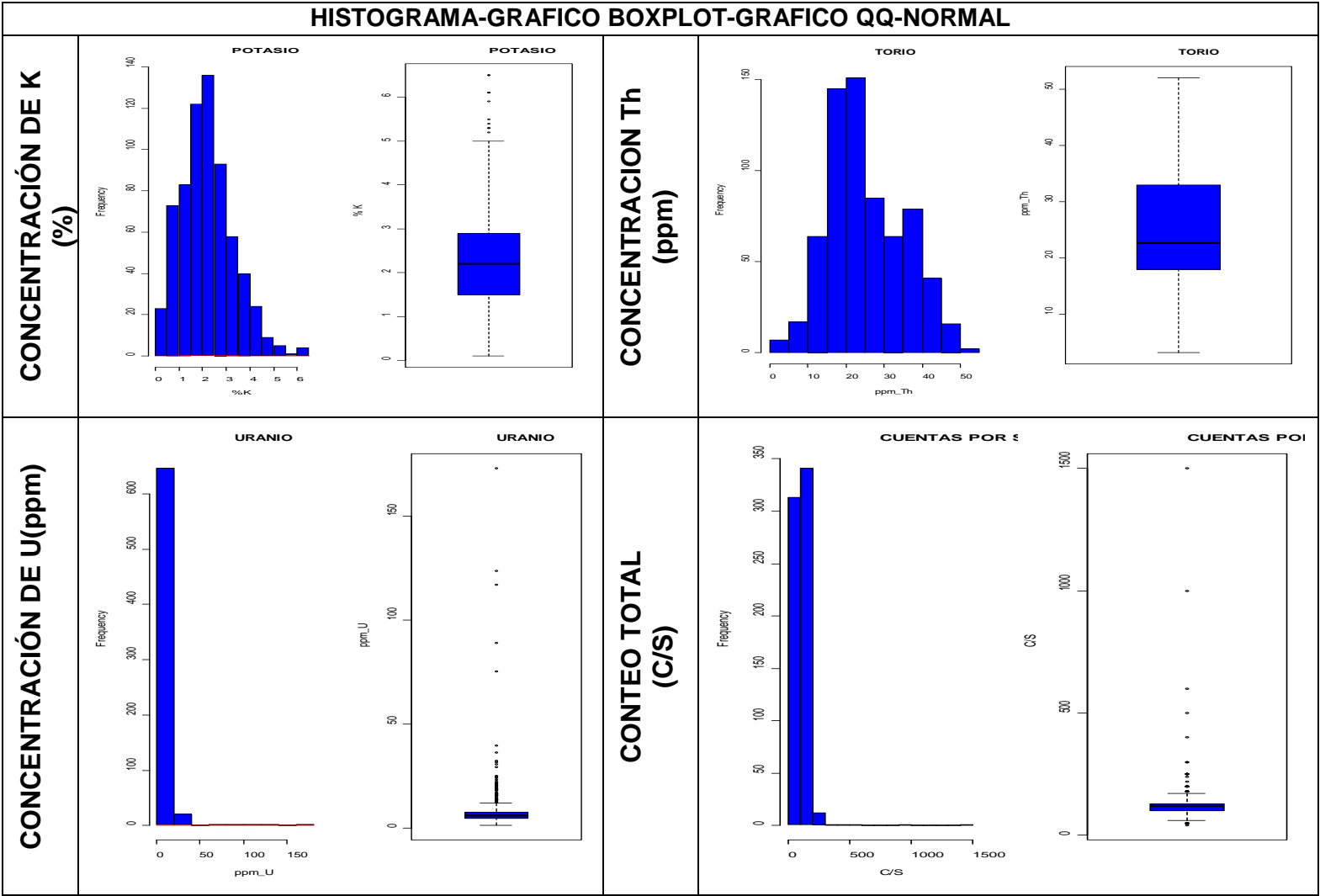
Los valores de los coeficientes de variación promedio indican un alta heterogeneidad en la distribución de los tres radioelementos aunque se puede observar un comportamiento más del regular del torio (39.28%) y del potasio (47.85%) esto se ve reflejado en las curvas de los histogramas las cuales presentan un comportamiento más simétrico (Figura 3-1) que en el uranio (137.9%) donde el histograma presenta una distribución asimétrica a la derecha, indicando la presencia de un número significativo de valores atípicos susceptibles de distorsionar los datos de análisis estadísticos posteriores, autores como Asfahani (2005), indica que el uranio presenta una movilidad relativamente mayor en comparación con el Th y el K bajo una mismas condiciones lo cual nos podría indicar el porqué de la distribución más heterogénea de este en el área.

- A continuación se muestran las Estadísticas descriptivas de las variables estudiadas. Moniquira, Boyacá, 2010.

Tabla 3.1. Estadísticas descriptivas de las variables. Datos medidos en la región de Moniquira Boyacá 2010.

Estadísticas descriptivas	K (%)	U ppm	Th ppm
Mínimo	0.1	1.2	3.2
Máximo	6.5	173	52
1st Qu	1.50	4.60	18.05
3st Qu	2.90	7.60	33.00
Promedio	2.27	7.86	25.18
Mediana	2.2	6.1	22.7
Desviación estándar	1.08	10.78	9.89
Desviación mediana	0.7	1.5	6.6
Asimetría	0.63	9.96	0.39
Kurtosis	3.717	125.10	2.44
Coef.var Promedio (%)	47.85	137.09	39.28
Coef.var. Mediana (%)	31.82	24.59	29.07

Figura 3-1.Graficas exploratorias para cada una de las variables

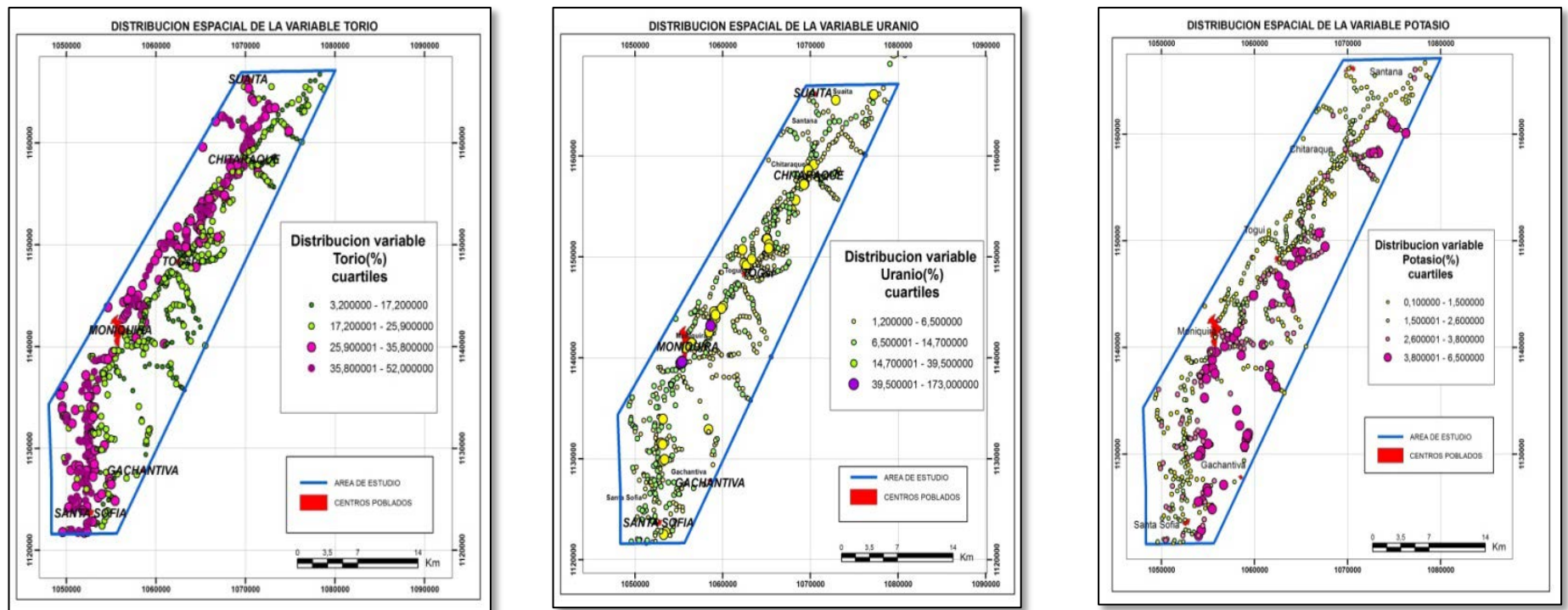


La distribución de los radioelementos naturales en el área de estudio se observan en la (Figura 3-2) Donde se puede observar que en el caso del torio las mayores concentraciones se presentan en la parte occidental del área, donde afloran las Formaciones Paja y Tablazo, en el caso de la variable Uranio los mayores contenidos se encuentran en la parte central donde se encuentra la Formación Paja mientras que para la variable Potasio los contenidos más altos se encuentran en la parte oriental donde afloran las Formaciones Cumbre y Arcabuco

Con respecto a los contenidos de cada radioelemento, en el potasio se pudo observar que los de mayor frecuencia se presentan en el orden de (1.5-3) %, en el uranio las menores concentraciones (menores a 50ppm) son las más frecuentes, y en el torio los contenidos más frecuentes oscilan entre 20-50ppm.

Los análisis realizados indican que existe una alta variabilidad además de una notoria heterogeneidad en los datos indicando que ni la media ni la varianza de las variables analizadas parece ser constantes y que la media no es una buena representación de los valores encontrados.

Figura 3-2. Clasificación de observaciones de las variables K, U y Th en intervalos y ubicación de estas dentro del área de estudio.
 Datos medidos en la región de Moniquira Boyacá en 2010



Con el fin de ver la relación entre las diferentes variables analizadas se realizaron la matrices de correlación correspondiente por el método de Sperman, Restrepo, (2007) Menciona que una de las ventajas es que este es un método robusto frente a la presencia de outliers o datos atípicos la Tabla 3.2 muestra los coeficientes de correlación para las diferentes variables

Tabla 3.2. Matriz de correlación

	C_S	K (%)	U Ppm	Th ppm
C_S	1			
K_%	0.26	1		
U_ppm	0.46	0.12	1	
Th_ppm	0.50	0.09	0.19	1

Los resultados muestran que las variables más relacionadas son el conteo total con el uranio y el torio esto podría indicar que la radiactividad total de la zona está siendo producida en su mayor parte por los isotopos de Uranio y Torio respectivamente.

A nivel general el comportamiento de los parámetros estadísticos analizados para las concentraciones regionales de los radioelementos naturales permite suponer que la radiactividad de las rocas presentes es variable y que los datos se agrupan en más de una población de datos.

3.1 Datos atípicos

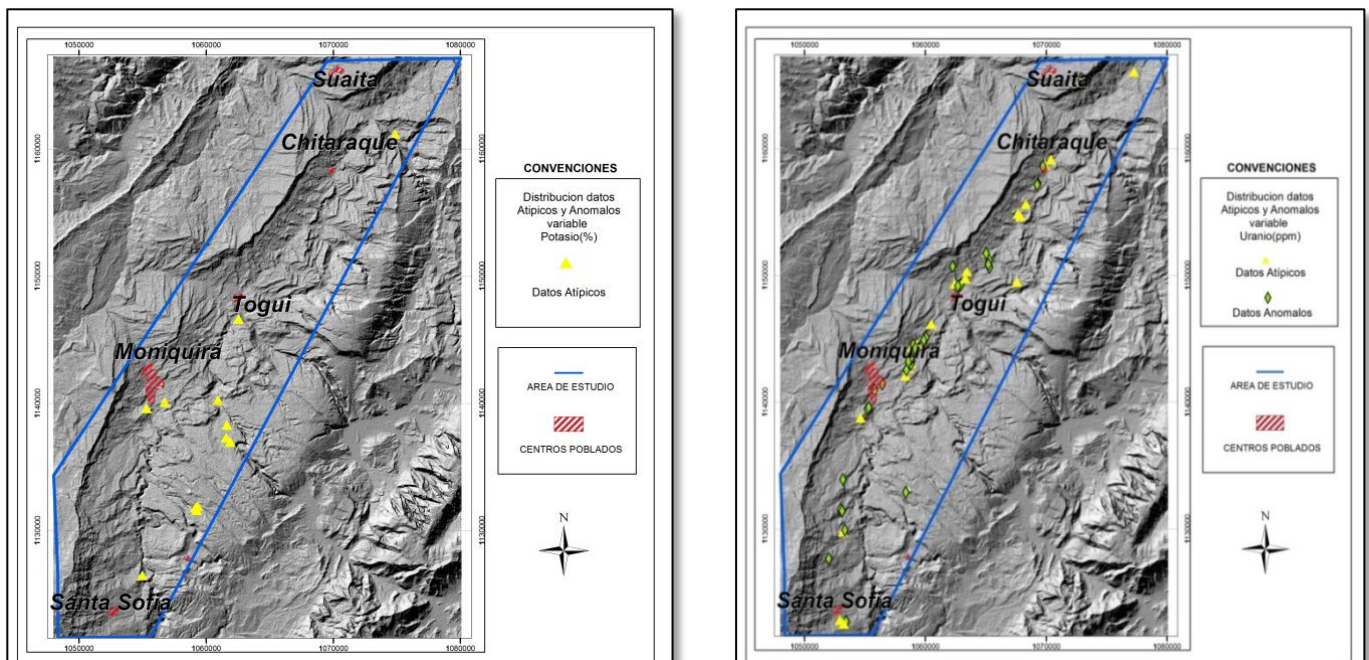
Las medidas de variabilidad nos indican que las variables K y U presentan datos atípicos y en el caso del U datos anómalos (Tabla 3.3), para el potasio se encuentran en las formaciones Cumbre, Ritoque y Rosa blanca y en el caso del Uranio la mayoría se encuentran ubicados a lo largo de la Formación Paja. (Figura 3-3)

Tabla 3.3. Medidas de variabilidad

VARIABLES	Q3	Q1	Max	MIN	RI	X25	X75	DATOS ATIPICO		DATOS ANOMALOS	
								X25-1.5RI	X75+1.5RI	X25-3RI	X75+3RI
POTASIO	2.9	1.5	6.5	0.1	1.4	1.5	2.9	NP	5	NP	NP
URANIO	7.60	4.6	173	1.2	3.0	4.6	7.60	NP	12.1	NP	16.60
TORIO	33.0	18.05	52	3.2	15.01	18.05	33.0	NP	NP	NP	NP

RI: Rango intercuantílico. NP. No presenta

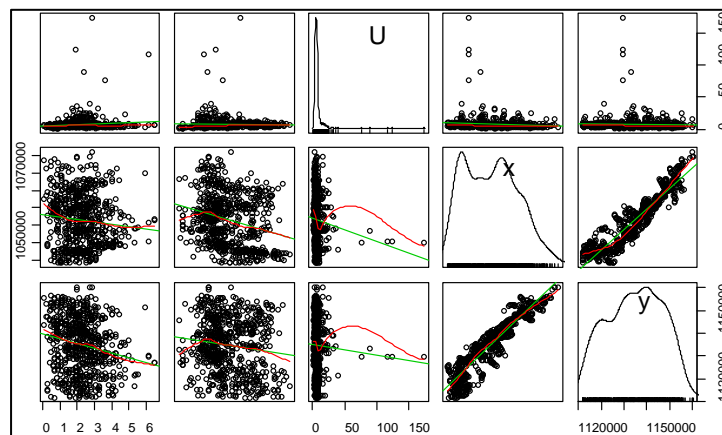
Figura 3-3 Distribución de datos atípicos y anómalos en las variables Potasio y Uranio
Datos medidos en la región de Moniquira Boyacá en 2010



En La Figura 3-1 y la Tabla 3.1 se observan las medidas descriptivas y el histograma para la variable uranio donde podemos indicar que esta presenta una distribución claramente asimétrica y coeficientes de variabilidad altos que muestran su heterogeneidad así mismo los diagramas de dispersión mostraron una tendencia lineal (Figura 3-4) la cual es originada por la presencia de datos atípicos por tal razón se consideró su exclusión del conjunto de datos total con el fin de analizar su comportamiento y la posibilidad de su remoción en el análisis estructural realizado.

Los resultados de las anteriores consideraciones se muestran en la Tabla 3.4. Donde los gráficos exploratorios muestran un comportamiento más simétrico así como un coeficiente de variación menor que en el conjunto de datos original. A su vez los nuevos diagramas de dispersión (Figura 3-5) mostraron una distribución aleatoria sin ningún tipo de tendencia para esta variable.

Figura 3-4 Matriz de diagramas de dispersión para las diferentes variables analizadas.
Moniquira Boyacá 2010



Por tanto, se cambiaron varias situaciones (análisis estructural y predicciones con datos atípicos y anómalos y análisis estructural sin datos atípicos y su inclusión en la predicción) donde se pudo concluir que la forma más adecuada de realizar los análisis era removiendo los datos atípicos del análisis estructural con el fin de cumplir con los supuestos necesarios pero dada la importancia de este tipo de datos en la exploración geológica y que estos se presentaron por condiciones propias de las rocas en donde se identificaron ya que algunas de las pruebas realizadas por el SGC (Servicio Geológico Colombiano) las cuales incluyeron difracción de rayos x indicaron la presencia de minerales secundarios de uranio como uranofana lo cual elevaría las mediciones de radiactividad descartando errores en las mediciones o problemas en los equipos utilizados.

Tabla 3.4. Medidas descriptivas y gráficos exploratorio sin datos anómalos variable Uranio

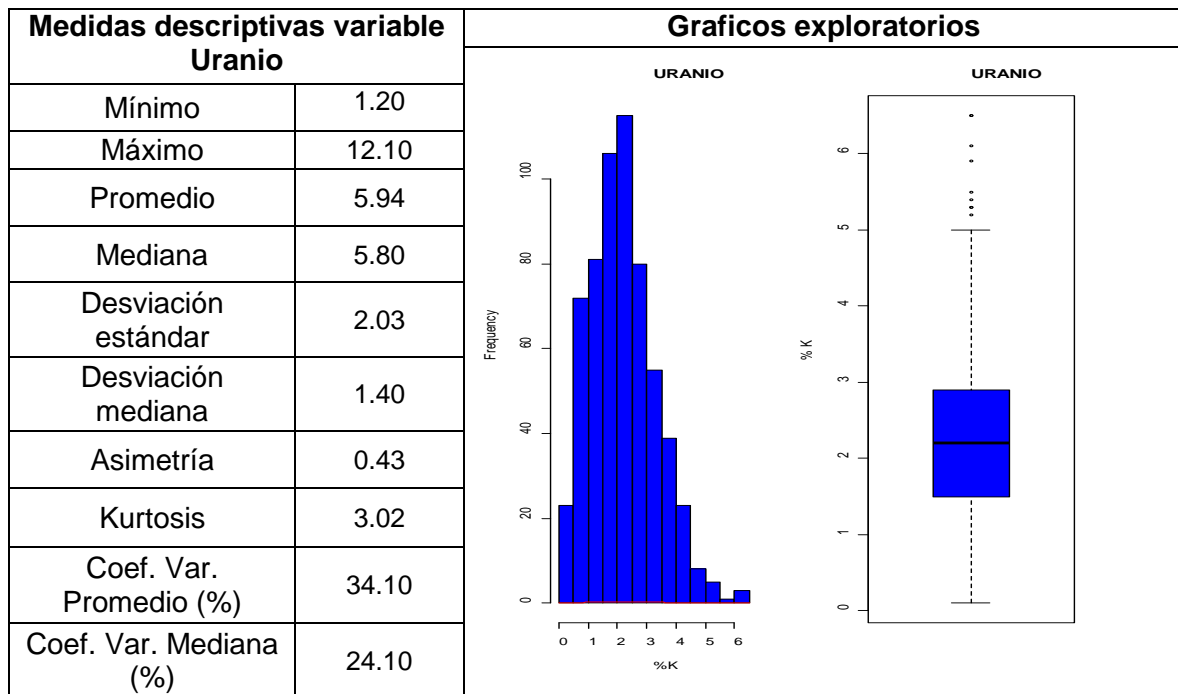
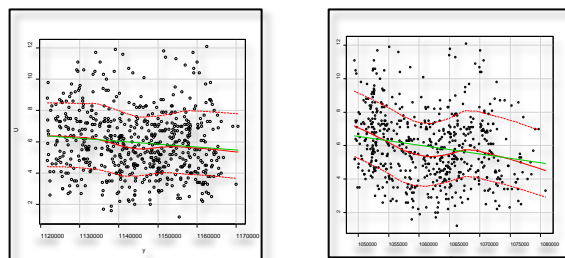


Figura 3-5 Diagramas de dispersión variable Uranio sin datos atípicos.



3.2 Análisis de Tendencia

Debido a que la hipótesis básica de la geoestadística es que el proceso sea estacionario, cuando los datos no parecen satisfacer dicha condición se buscan alternativas para cambiar su estructura tales como los modelos de regresión que buscan eliminar la tendencia y por lo tanto cumplir con los supuestos de los diferentes modelos, razón por la cual luego de evaluar cada variable a través de la matriz de diagramas de dispersión (Figura 3-4) se identificó que con respecto a la variable torio se puede indicar la presencia de algún tipo de tendencia en dirección norte lo que nos podría sugerir que

la media no es constante en la región de estudio. Una alternativa para mover esta tendencia es el ajuste de un modelo de regresión donde generalmente se emplean modelos polinómicos de segundo orden. Para este caso para remover la tendencia en la dirección norte se consideró la siguiente ecuación:

$$tTh = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_3 Y^2$$

En la Figura 3-6 se muestran el diagrama de dispersión y en Tabla 3.5 las medidas descriptivas y gráficos exploratorios de los residuales del modelo de regresión seleccionado

Figura 3-6 Diagramas de dispersión de los residuales del modelo de regresión seleccionado pasó a paso en dirección de la coordenada Norte

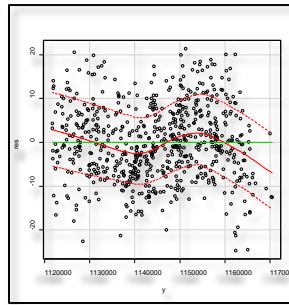


Tabla 3.5. Medidas de variabilidad y Graficas exploratorias variable Torio

	Th ppm	Gráficos Exploratorio
Mínimo	2.19400e+01	
Máximo	2.46000e+01	
Promedio	0.00000e+01	
Mediana	-7.00000e+01	
Desviación estándar	8.97000e+00	
Desviación mediana	6.09000e+00	
Asimetría	3.30000e-01	
Kurtosis	2.60000e+00	
Coef.var Promedio (%)	-6.66891e+18	
Coef.var.Mediana (%)	-8.68040e+02	

Posteriormente se volvió a analizar el comportamiento de la distribución de los residuales del modelo de regresión en donde el gráfico muestra que los datos se encuentran en los cuartiles teóricos por lo tanto se puede considerar que la distribución es homogénea, el diagrama de caja a su vez presenta una distribución relativamente simétrica. Lo que sugiere que sobre los residuales del modelo es posible considerar la media y las varianzas constantes a lo largo del proceso y con estos realizar los análisis posteriores.

Para el caso de la variable potasio luego de analizar los gráficos de dispersión (Figura 3-4) se observó que no se presentan ningún tipo de tendencia a su vez el histograma y diagrama de caja de la variable original muestra una distribución simétrica y aunque el coeficiente de variación es alto la transformación de los datos no disminuyó esta variabilidad por tal razón en el caso específico del K el análisis estructural y predicción se realizó con la variable original

3.3 Estimación de parámetros geoestadísticos y ajuste de modelos

El análisis estructural se realizó mediante la estimación del semivariograma experimental de los parámetros asociados a los modelos de mejor ajuste estos fueron estimados por el método de mínimos cuadrados y máxima verosimilitud, La Tabla 3.6 muestra el resumen de la estimación de parámetros de los modelos de semivarianza considerados para cada una de las variables.

A partir de los semivariogramas de cada variable se realizaron los cálculos de semivarianza la cual es una herramienta importante en la determinación de características de variabilidad y correlación espacial, porque da una descripción de como varían los datos de una localización a otra. Los modelos de mejor ajuste al semivariograma se escogieron dentro de una gama de posibilidades que incluían los modelos Gaussiano, Esférico, Lineal y Exponencial. (Tabla 3.6)

Tabla 3.6. Modelos de semivarianza ajustados y parámetros
Para las variables. Moniquira, Boyacá, 2010.

VARIABLE	MODELO	PARÁMETROS ESTIMADOS			
POTASIO	Exponencial	MAX DIST	SILLA	RANGO	NUGGET
		9615	0.78	2338	0.42
	Gaussiano	9615	0.68	2598	0.49
	Esférico	9615	0.75	5976	0.45
	Matern	9615	0.78	2598	0.45
TORIO	Exponencial	11535	37.17	1871	39.35
	Esférico	11535	39.35	4053	37.17
	Matern	11535	45.91	1871	37.17
URANIO	Exponencial		1.36	5457	2.95
	Esférico		2.04	7796	3.06
	Matern		1.02	2728	3.06

3.4 Validación cruzada

La selección definitiva del modelo se realizó con los modelos con el cual se puedan generar las mejores predicciones. Santa L, (2011) indica que al ser kriging un método de interpolación exacto se acostumbra a usar la técnica de validación cruzada con el fin de evaluar la calidad de las predicciones y así determinar qué modelo proporciona las mejores. En la Tabla 3.7 se muestran los modelos teóricos ajustados para cada variable con los respectivos parámetros estimados, y en la Figura 3-7 se muestran los tipos de semivariogramas ajustados para cada una de las variables.

Tabla 3.7. Parametros modelos seleccionados

Modelo	Método	Silla Sigmasq	Rango phi	Pepita tausq	r ²	variable
Esférico	Máxima verosimilitud Restringida REML	0.87	59.76	0.64	0.016	POTASIO
Esférico	ML	43.21	40.53	38.29	0.03	TORIO
Esférico	WLS	0.59	137.49	3.52	0.004	URANIO

Los semivariogramas encontrados muestran que las variables presentaron estructura de autocorrelación espacial, lo cual indica que a menor distancia entre sitios evaluados mayor similitud en el valor de la variable. Los rangos encontrados en los modelos de semivarianza ajustados van desde 4053 m hasta 13749m. (Tabla 3.7). Según la distancia del rango (Ao) se encontró que para la variable uranio existen distancias de dependencia espacial largas para las condiciones del área de estudio (13749), en este caso es posible que no se conozca la totalidad del proceso de autocorrelación, es decir que el tamaño del área muestreada y la longitud del área muestral podría no ser suficiente para calcular o cuantificar la totalidad de la tendencia espacial de la variable.

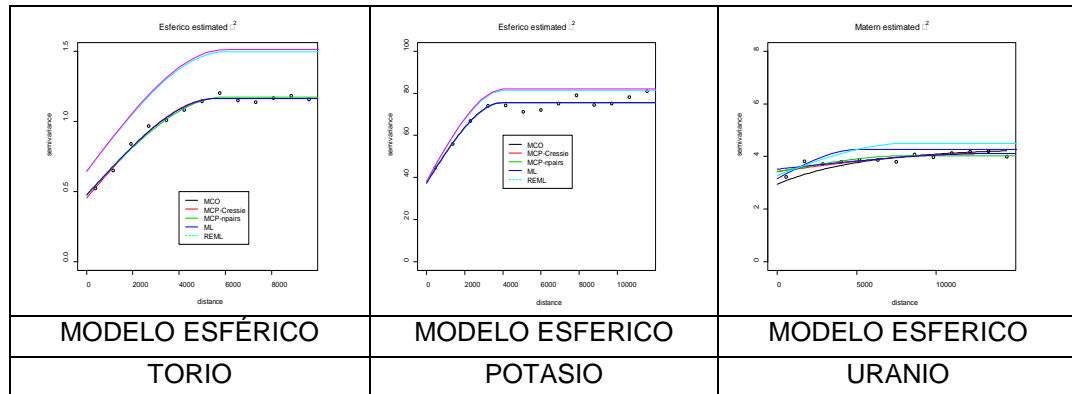
Los modelos encontrados para las tres variables fueron esféricos y ya que estos modelos son acotados indica que se cumple con la hipótesis de estacionariedad (Biau et al, 1997; Samper y Carrera, 1990 en Giraldo 2010), los rangos de dependencia espacial fueron 5976 m. para potasio y 4053 m. para torio, lo cual resulta relativamente bajo teniendo en cuenta que las distancias entre norte y sur del área de estudio es de 55 km y y 143 km en su parte más angosta esta cortas distancias nos indicarían que el fenómenos de auto correlación es más fuerte para estas variables

En relación al efecto pepita y a la meseta, al evaluar la razón entre ellos para las tres se encontraron valores altos, (superiores al 50%) es decir que una alta proporción de la variabilidad está siendo explicada por este efecto, indicando predicciones menos confiables.

Aunque no se ha definido un umbral exacto en el cual la proporción entre pepita/meseta indique cuando un proceso presenta variación espacial o variación no explicada (aleatoria), se considera generalmente que cuando esta razón es muy alta, es decir que el efecto pepita este por arriba del 50%, la variable podría estar variando a distancias menores que las muestreadas (Martínez y Zinck, 1994) y como consecuencia de esto se pueden presentar mayores errores de interpolación, es decir la incertidumbre seria alta para los mapas obtenidos, como anota Yemefack et al., (2005), en este caso se recomendaría experimentar con redes muestrales más densas (Martínez y Zinck, 1994).

Lo anterior indica que en la modelación de los anteriores parámetros se debe incluir un diseño muestral mucho más denso con el fin de determinar su estructura a menor escala.

Figura 3-7 Semivariogramas experimentales y ajustes de modelos teóricos para el uranio, torio y potasio medido en Moniquira .Boyacá 2010



3.5 Predicción de variables y generación de mapas

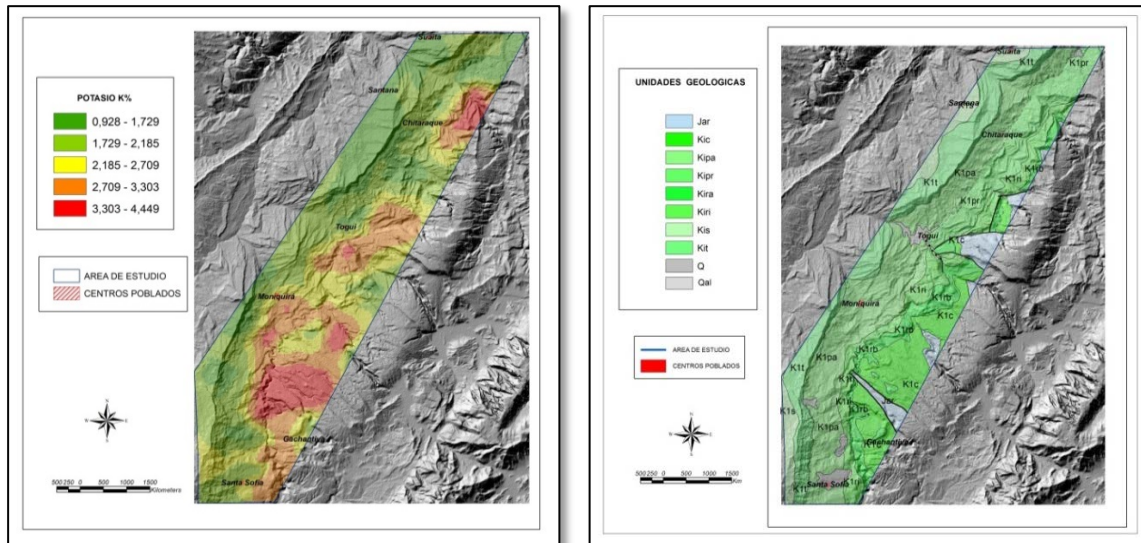
Una vez escogidos los modelos de semivarianza definitivos se realizó la predicción por medio de kriging (transgaussiano, ordinario o Residual según cada caso) se elaboraron mapas de distribución de las variables en la zona estudiada así como los mapas de varianza de predicción de los mismos (Figura 3-8, Figura 3-9, Figura 3-10)

3.5.1 Potasio

En la Figura 3-8 se observa una relación del comportamiento espacial de cada radioelemento con la litología del área en el caso del potasio hacia la zona occidental se presentan los menores valores y hacia la zona oriental los mayores, con base en lo anterior se puede indicar que el tipo de roca aflorante en esta área presenta condiciones más favorables para la acumulación de este isótopo. Según Oyarzun, L (2002). los minerales clasificados como feldespatos ortoclasa, microclina y las micas biotita y moscovita son los que presentan mayor contenido de potasio y Ulloa, M. (1978) describe a la Formación Cumbre en el área de estudio (Figura 3-8) Como una secuencia constituida por una alternancia de limolitas arenosas, amarillentas, rojizas, moscovíticas y arcillolitas; esta formación aflora en los lugares donde se presentan los mayores contenidos de potasio es decir que los minerales constituyentes y ambientes de formación de los mismos facilita la acumulación del potasio en esta unidad geológica.

Urquhart W, indica que los cambios en la concentración de radioelementos como el potasio pueden relacionarse con casos de mineralización primaria, procesos secundarios o el mayor grado de erosión y estas variaciones están sugiriendo que el área de estudio presenta condiciones geológicas heterogéneas para la acumulación de este isotopo.

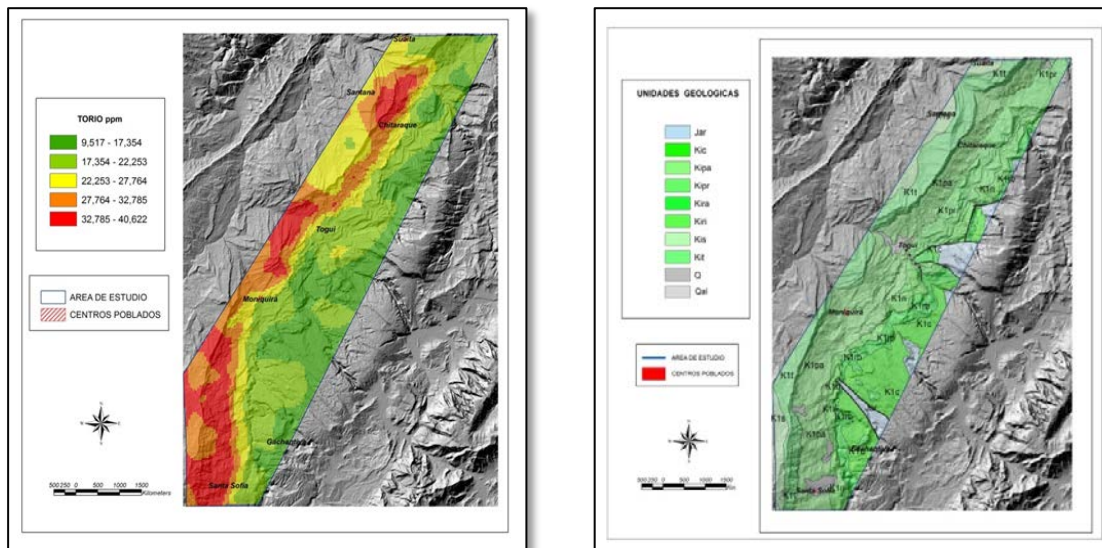
Figura 3-8. Izq. Mapa de predicción de la variable Potasio. Der. Mapa Geológico.



3.5.2 Torio

En el caso de la variable torio los valores más altos se encuentran hacia la zona occidental del área donde afloran las Formaciones Paja y Tablazo (Figura 3-9) la Formación Tablazo está conformada por una secuencia litológica de calizas grises oscuras, algo arcillosas, lutitas grises oscuras a negras con nódulos ferruginosos e intercalaciones de limolitas, calizas negras fosilíferas con capas delgadas de margas; en el área de estudio aflora en la parte occidental formando las zonas más altas, la Formación Paja es una secuencia litológica de shales negros con abundante materia orgánica, los shales son ligeramente calcáreos y micáceos, localmente con nódulos y concreciones calcáreas o, con costras de óxidos de hierro y abundantes nódulos piritosos es decir que las concentraciones más alta de torio se dan en las formaciones que constan principalmente de calizas y shales.

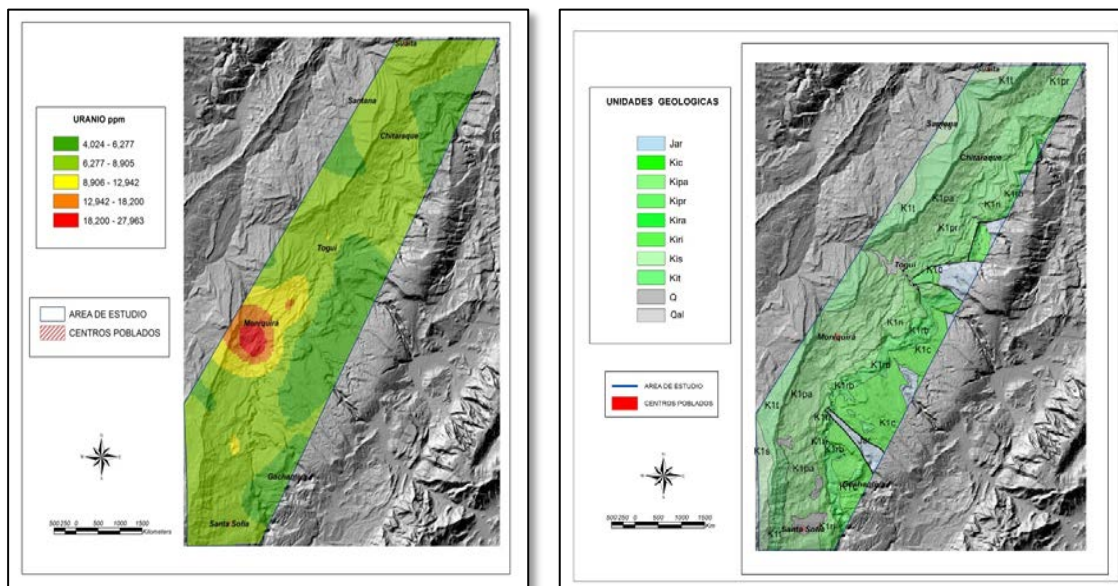
Figura 3-9.Izq. Mapa de predicción de la variable Torio. Der. Mapa Geológico



3.5.3 Uranio

En el caso de la variable uranio los valores más altos se encuentran hacia la zona occidental del área sobre la formaciones paja la cual es una secuencia litológica de shales negros con abundante materia orgánica (Figura 3-10)

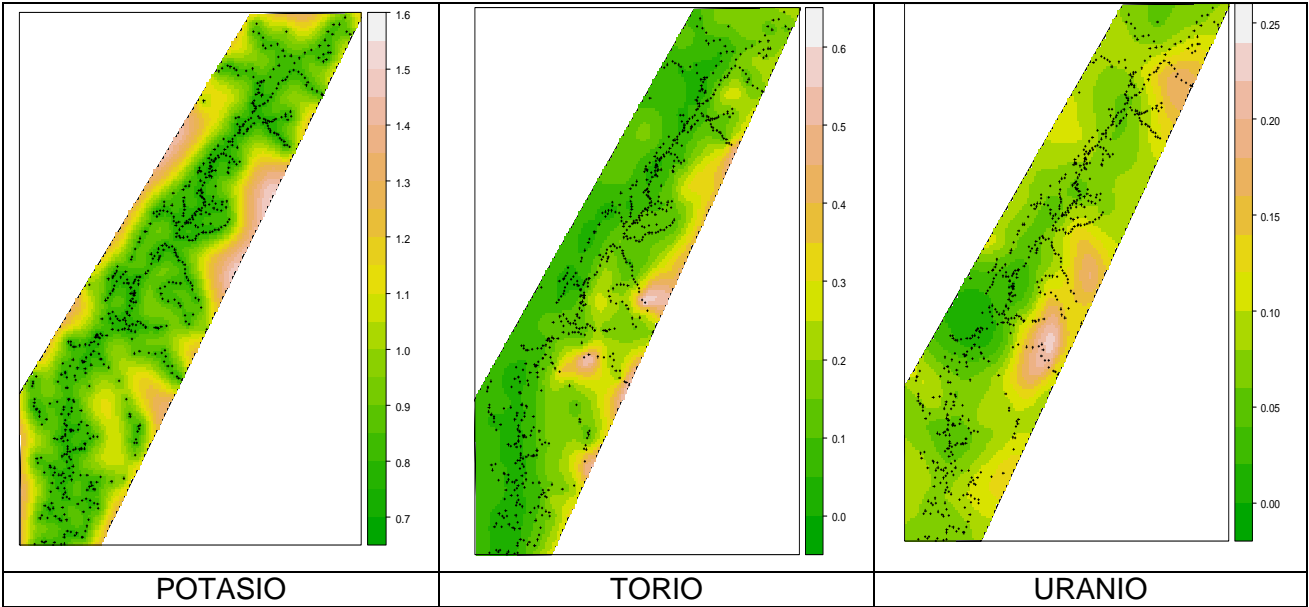
Figura 3-10.Izq.Mapa de predicción de la variable Uranio. Der. Mapa Geológico.



Así mismo se construyeron las varianzas de predicción para los tres mapas obtenidos (Figura 3-11) donde se observa que la varianza de predicción para las tres variables es mayor en los bordes sobre todo en la margen occidental del área esto se debe a que la

distribución de los puntos de muestreo es menor hacia estas zonas, en la parte central la varianza es menor ya que la densidad de puntos y los valores de los datos son muy cercanos en estas zonas.

Figura 3-11. Varianzas de predicion para la variables Potasio Uranio y Torio.



3.6 Análisis con sensores remotos

Una vez realizados los procesamientos de la imagen Landsat descritos en el capítulo anterior se procedió analizar ciertas características que fueron resaltadas mediante el uso de esta imagen procesada y el conocimiento en campo de la zona de estudio. Algunos de estas se muestran en la siguiente figura.

Figura 3-12. Características estructurales resaltadas

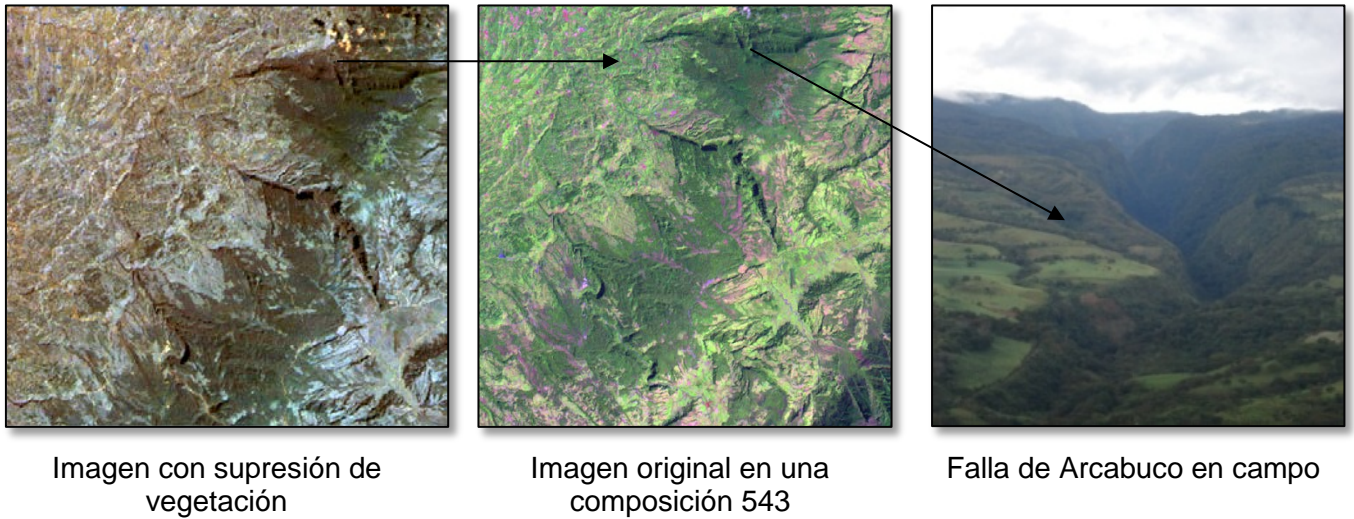
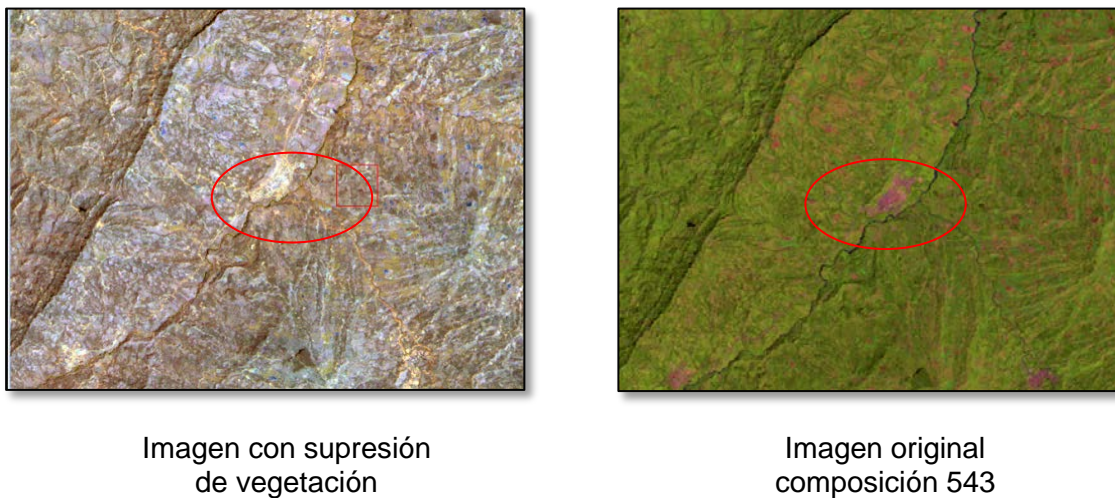


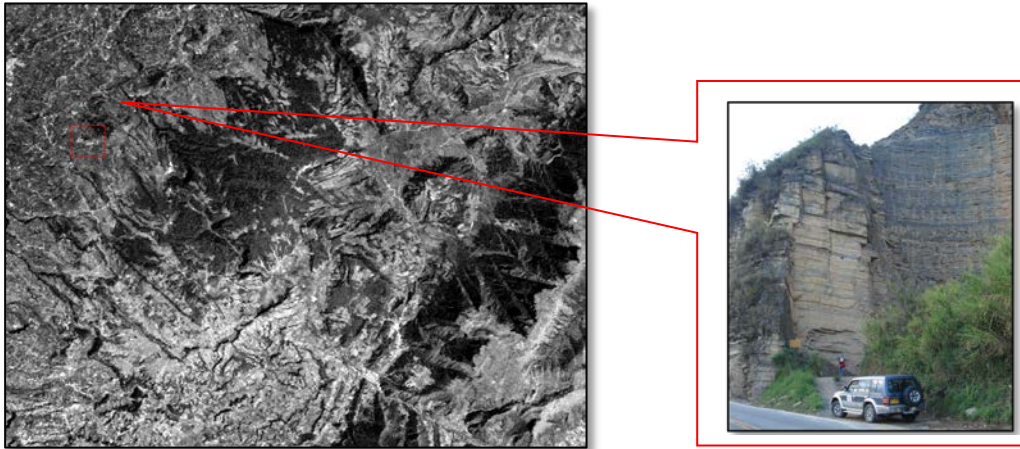
Figura 3-13. Áreas urbanas con mayor definición



Posteriormente a las correcciones y mejoramientos realizados se calcularon diferentes ratios con el fin de identificar las respuestas de los minerales presentes en el área en las siguientes figuras se mostraran los resultados obtenidos:

- **RATIO TM3/TM1**

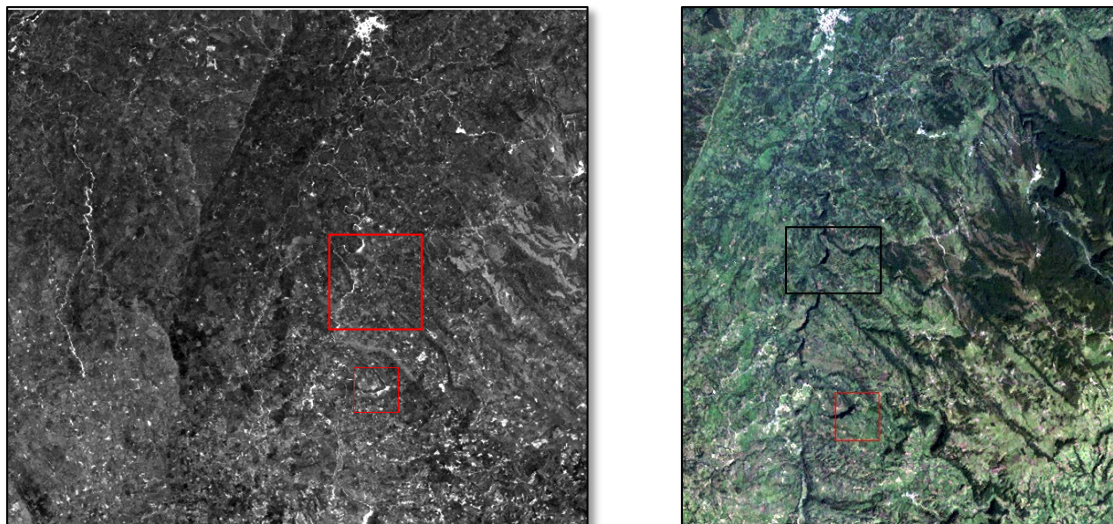
En la Figura 3-14 .Izquierda se observa la imagen resultado del Ratio aplicado el cual resalta algunas explotaciones vistas en campo (Figura 3-14.Der) en este caso se observó en tono más blanco algunas canteras presentes en el área.

Figura 3-14. Imagen Resultado mejoramiento - Ratio $Tm3/Tm1$ 

Fuente: Imagen derecha. SGC, 2010

- **RATIO $TM4/TM1$**

Como se observa en la Figura 3-15 algunos afloramientos de roca con contenidos de carbonatos son resaltados en tonos más claros (Figura 3-15. Izquierda) los cuales no se mostraban claramente en la imagen original (Figura 3-15.Derecha).

Figura 3-15. Comparación imagen resultado mejoramiento (Ratio $Tm4/Tm1$) Izq. Con imagen Original Der.

Rocas con contenidos de carbonatos
(calizas de la Formación Rosablanca)

Imagen original desplegada en el
software ENVI en una combinación en
verdadero color 321

Figura 3-16. Vista en campo de algunos de los lugares donde afloran calizas en el área que se resalta en la Figura 3-15



- **RATIO TM3/TM7**

Con la aplicación de este ratio se presentaron contrastes claros en la zona oriental con respecto a la occidental los cuales estos podrían indicar que las formaciones de la parte oriental presentan más contenidos de arcillas que en la zona occidental apoyando los mapas de predicción obtenidos para la variable potasio donde los valores más altos se presentan en la zona oriental del área de estudio.

Figura 3-17. Comparación imagen Resultado mejoramiento ratio (Tm3/ Tm7)- con mapa geológico

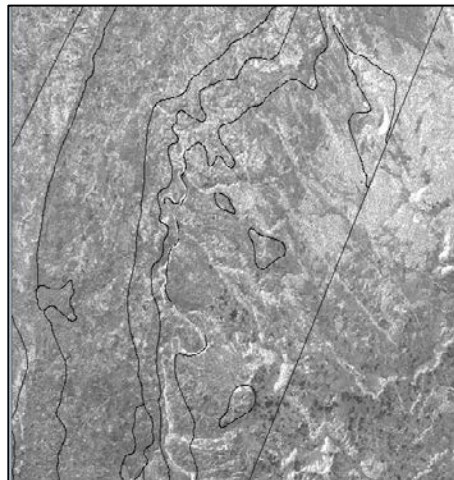
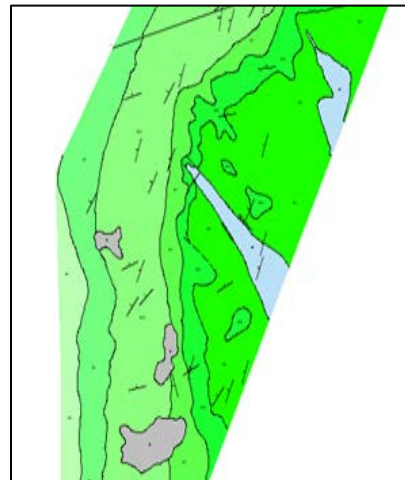


Imagen resultado
Ratio Tm3 /Tm7



Mapa geológico Escala 1:25000
Fuente INGEOMINAS 2010

Con el fin de identificar otras características las imágenes resultantes de cada ratio fueron desplegadas en diferentes combinaciones de color (RGB); logrando resaltar algunos rasgos como en el caso de la Formación Arcabuco compuestas por fuertes paquetes de arenisca cuarzosa la cual se presenta en colores morados (Figura 3-18). Diferenciándose claramente de las otras unidades así mismo se resaltan estructuras como el Anticlinal Arcabuco (Figura 3-19)

Figura 3-18. Imagen en combinación TM3/TM4, TM3/TM1, TM3/TM4 (RGB)

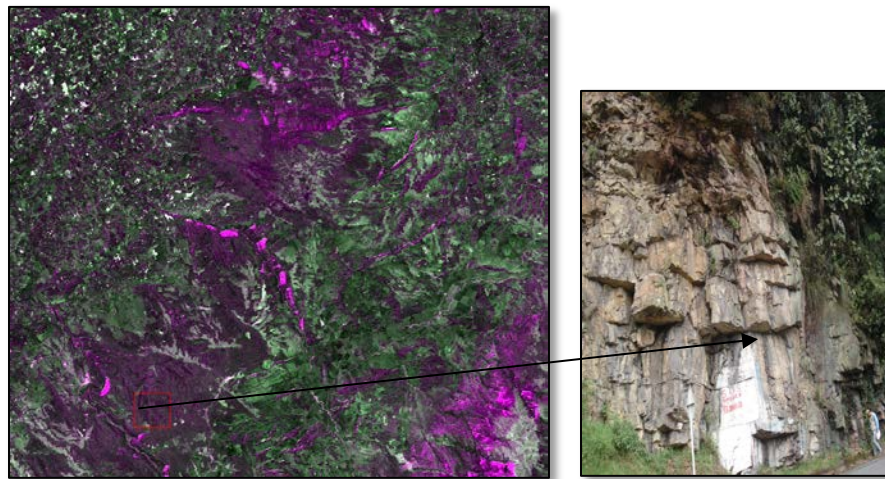
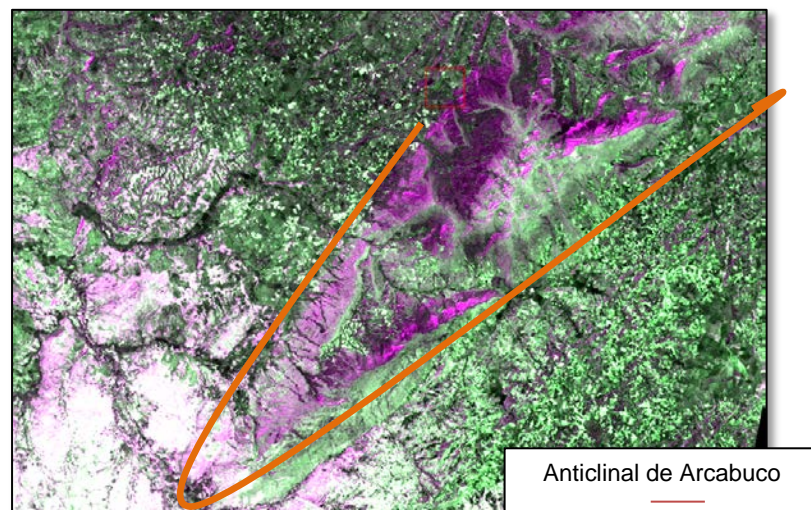


Figura 3-19. Rasgos estructurales resaltados



Aunque el análisis con sensores remotos fue realizado de manera preliminar se pudo indicar que aunque se obtendrán mejores resultados con una imagen de mayor

resolución espectral algunas litologías presentes fueron resaltadas y la profundización en este tema requiere una investigación profunda que considere aspectos propios de los minerales radiactivos.

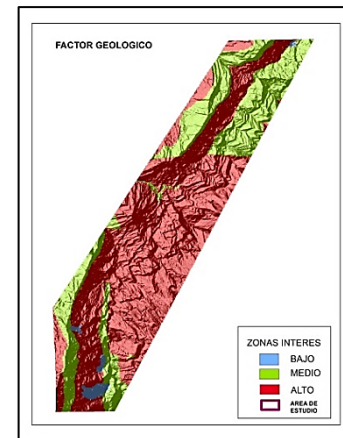
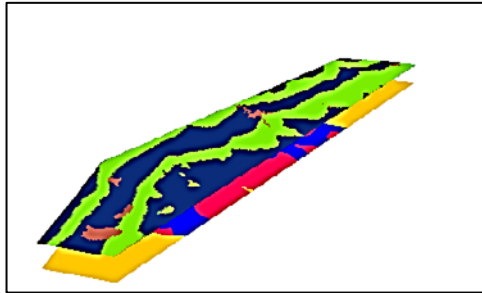
3.7 Determinación de zonas de interés

El objetivo del procesamiento de datos geográficos raster incluye una gran cantidad de propósitos como el de determinar relaciones espaciales, detectar patrones, generar nuevas capas de datos, y desarrollar modelos para solucionar problemas espaciales y de toma de decisiones. Como en el caso de la determinación de zonas de interés donde una vez cada componente de entrada es discretizada se realiza una agrupación de los píxeles que componen el raster en determinadas clases asignando un valor común a todos los píxeles que componen cada clase o intervalo, definidos como bajo medio y alto. Posteriormente se realizó el análisis de superposición para así generar las áreas con mayor probabilidad de encontrar minerales radiactivos de acuerdo a las condiciones establecidas. Estas operaciones de superposición corresponden a procesos que permiten fundir los atributos de valores de varias capas, mediante operadores lógicos u operadores aritméticos (And, OR entre otros). En la superposición de ráster, cada celda de cada capa hace referencia a la misma ubicación geográfica, lo que le permite combinar matemáticamente las capas y asignar un nuevo valor a cada celda en una capa de salida (Yeung, 2002) la secuencia de operaciones seguidas se observa en las Figura 3-20.

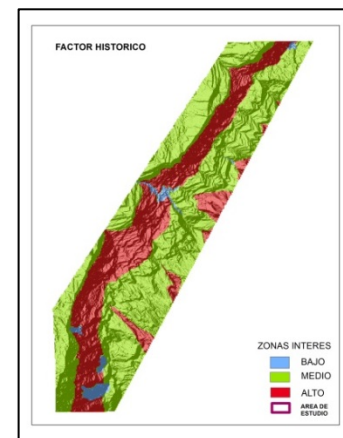
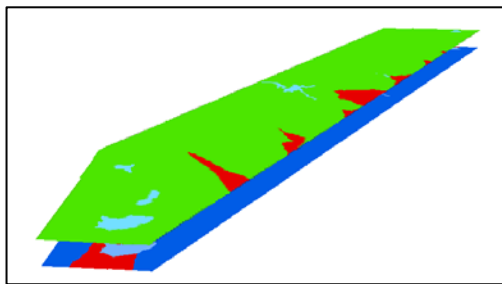
Las características de este análisis de superposición es que permite combinar varias capas en una sola que para el caso del presente estudio es identificar las zonas con mayor interés en la exploración de este tipo de minerales.

Figura 3-20 . Esquema de Operaciones de superposición para la determinación de zonas de interés en la exploración de minerales radiactivos.

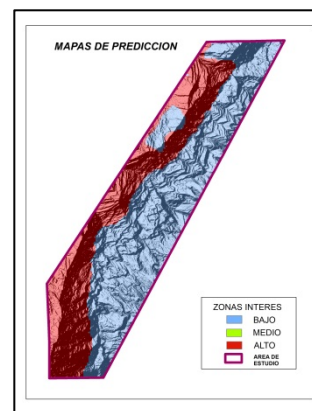
FACTOR GEOLOGICO



FACTOR HISTORICO

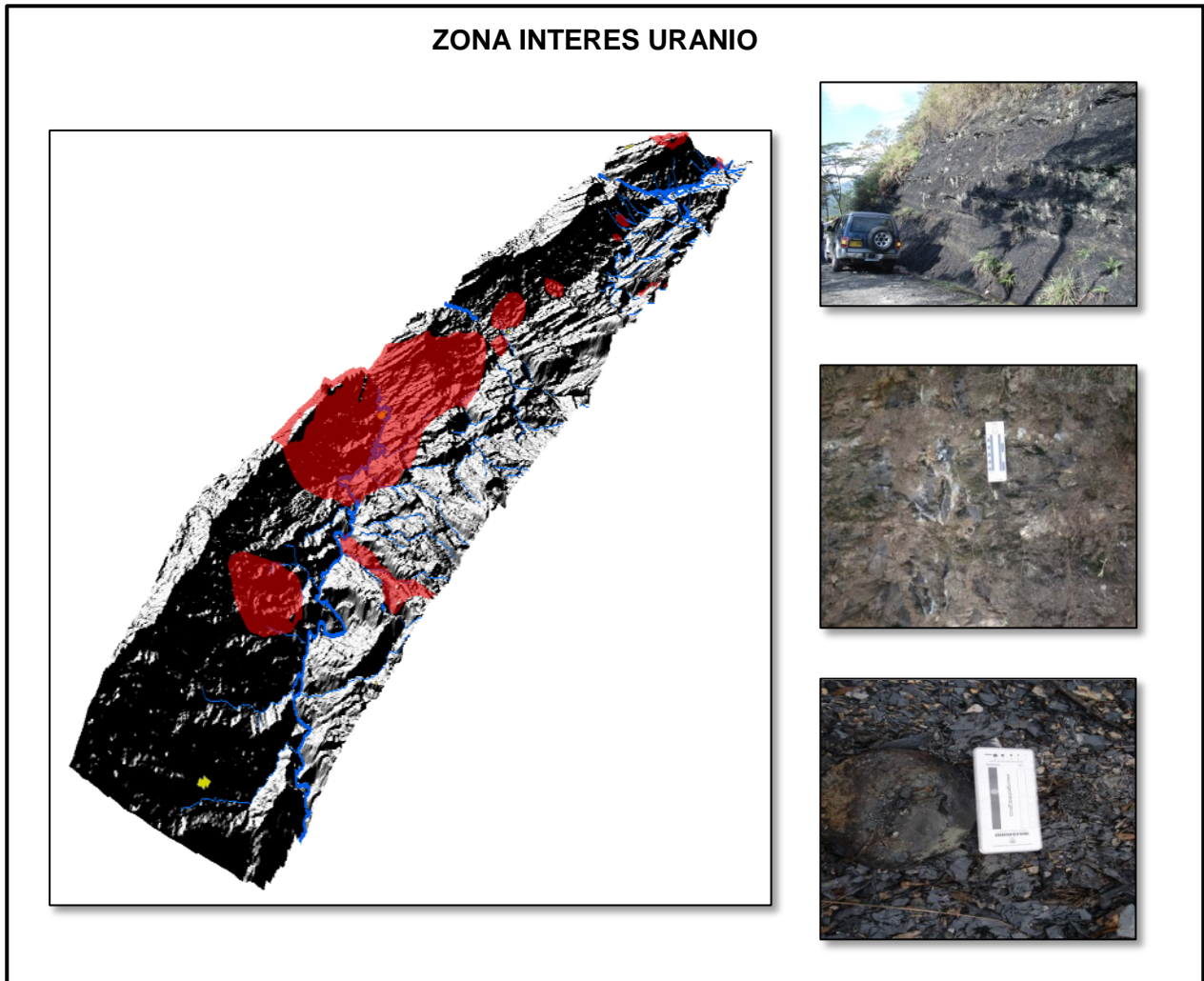


MEDICIONES DE RADIATIVIDAD



Finalmente se obtuvieron las zonas de interés para los tres elementos estudiados Uranio Torio y Potasio las cuales presentan las siguientes características:

Figura 3-21 . Zona interés variable Uranio

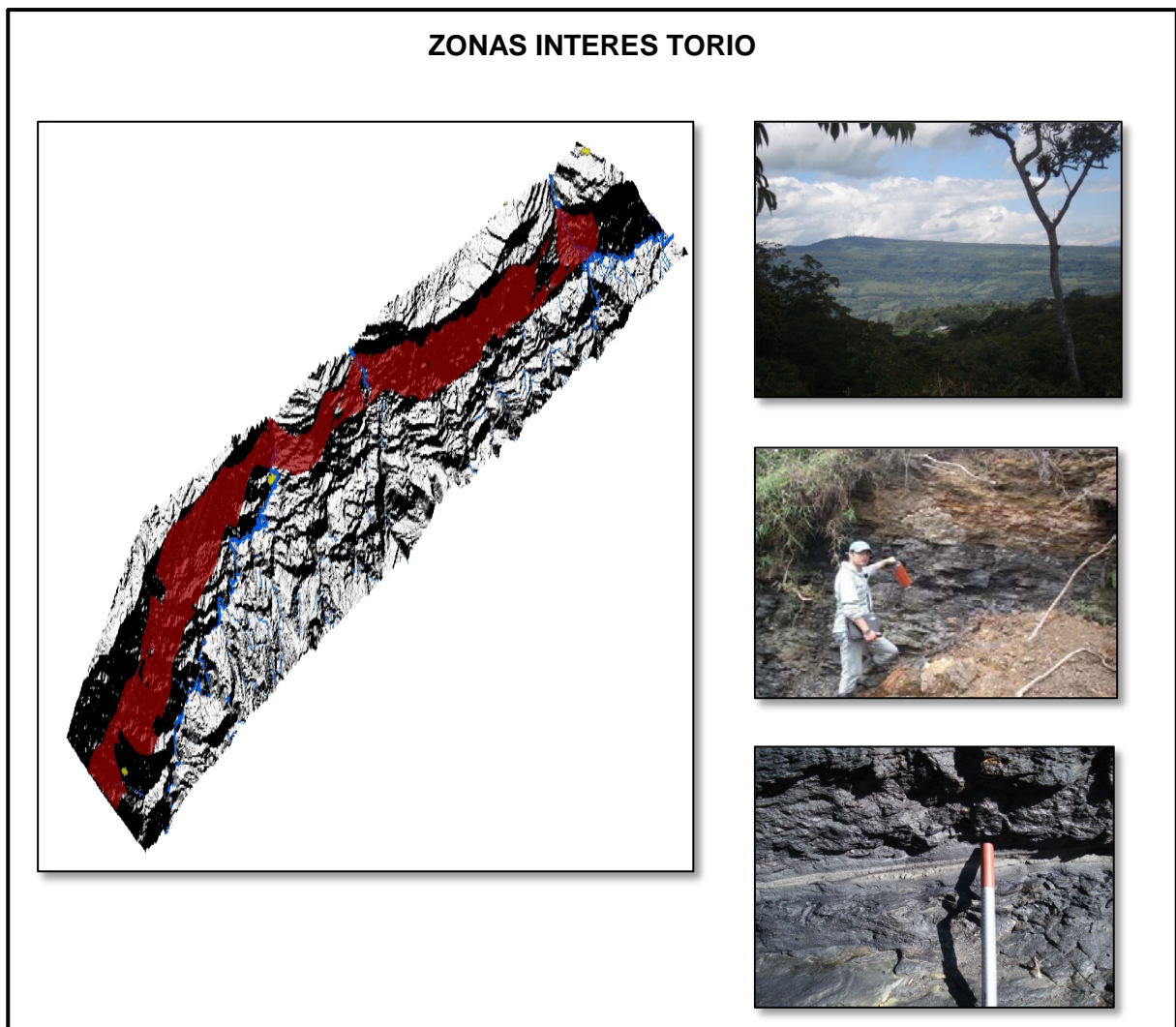


Para el caso del uranio los sectores identificados (Figura 3-21) se encuentran en las Formaciones Paja, Tablazo y Arcabuco estas zonas de acuerdo a lo visitado en campo se presentan en lutitas negras en capas delgadas con presencia de nódulos piritosos principalmente (Figura 3-21) y en menor proporción arcillolitas con alternancia de areniscas; Según Szalay, 1954; Manskaya, D, y Emeliyanova, 1956; Salía, 1958, en Vernon E.1961 se ha demostrado experimentalmente que las sustancias orgánicas lutitas (shales) ricas en ácidos húmicos contienen soluciones uraníferas, donde el proceso de lixiviación del uranio ha consistido en un intercambio iónico, de tal manera que este ha desplazado a los iones de hidrógeno del total de la sustancia orgánica,

permitiendo la presencia y acumulación de este. Por tanto el uranio se encuentra en un estado reducido, fijado en moléculas orgánicas, o distribuido como minerales de uranio coloidal absorbidos por materia orgánica. Estas consideraciones apoyan a considerar que las zonas resultantes son válidas ya que estas presentan las condiciones para que este elemento pueda concentrarse en ellas.

En el caso del torio (Figura 3-22) estas zonas se presentan no solo en lutitas también en calizas y limolitas de las formaciones Paja y Tablazo lográndose identificar que según lo observado en campo las zonas de interés presentan rocas con un tamaño de grano mayor que en el caso del uranio así mismo se presenta alternancia de areniscas. En el caso del Torio el Geochemical Services INC,(1991) indica que las rocas sedimentarias como calizas y lutitas presentan contenidos promedio mayor de torio que en el caso de las areniscas o las arcillas estas rocas calcáreas en su mayoría están formado por elementos provenientes de Rocas ígneas o sedimentarias cuyo calcio es arrastrado en forma de carbonato ácido de calcio por los cuerpos de aguas superficiales o por aguas subterráneas cargadas de anhídrido Carbónico. De allí la presencia del torio que por su alta solubilidad forma parte de este tipo de rocas.

Figura 3-22 . Zonas de interés variable Torio



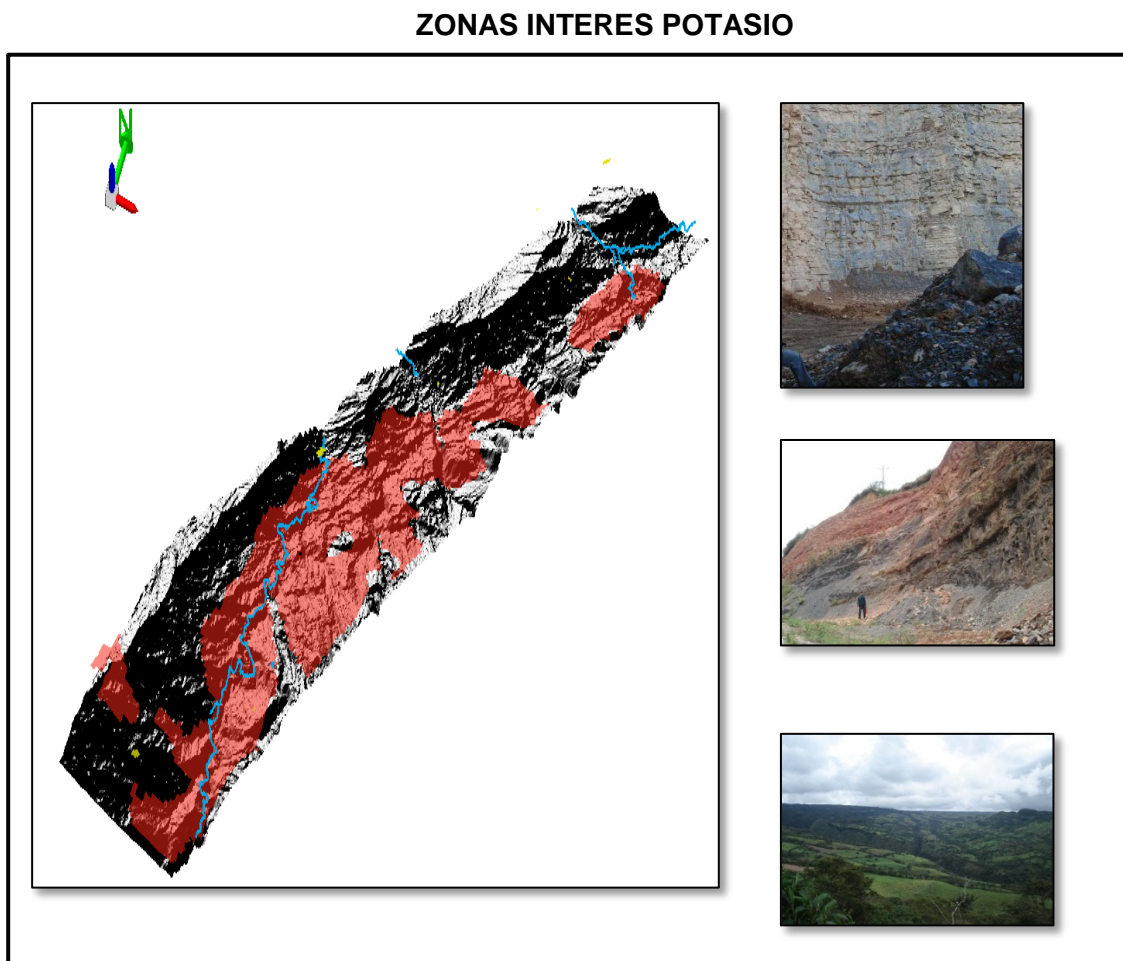
Las zonas identificadas con mayor interés para la variable potasio () se encuentran ubicadas dentro de las formaciones Rosablanca, Paja, Cumbre compuestas principalmente por calizas, lutitas y arcillolitas estas zonas a diferencia de los anteriores elementos se encuentran ubicadas en la margen oriental de la zona de estudio; autores como González, L (2012) reportan hallazgos de yacimientos de sales de potasio en la Formación Rosablanca, Formación Paja, en el departamento de Santander además este autor menciona que la presencia del potasio en estas formaciones es concordante con la solubilidad de estos minerales (Melgar y Castro, 2002) en González, L (2012). Así mismo Oyarzun, L (2002). Indica que los minerales clasificados como feldespatos

ortoclasa, microclina y micas como la biotita y moscovita son los que presentan mayor contenido de potasio. Ulloa, M. (1978) describe a la Formación Cumbre en el área de estudio como una secuencia constituida por una alternancia de limolitas arenosas, amarillentas, rojizas, moscovíticas y arcillolitas; esta formación aflora en los lugares donde se presentan los mayores contenidos de potasio es decir que los minerales constituyentes y ambientes de formación de los mismos facilita la acumulación del potasio en esta unidad geológica.

Urquhart W, (1995) indica que los cambios en la concentración de radioelementos como el potasio pueden relacionarse con casos de mineralización primaria, procesos secundarios o el mayor grado de erosión y estas variaciones están sugiriendo que el área de estudio presenta condiciones geológicas heterogéneas para la acumulación de este isótopo

Así mismo Gonzalez L, (2012) indica que los sedimentos de la Formación Paja se depositaron en un ambiente evaporítico y que futuros estudios geológicos detallados de esa unidad pueden llevar al hallazgo de mineralizaciones de interés económico para este mineral

Figura 3-23 . Zonas de interés variable Potasio



Finalmente a través de los diferentes análisis y modelamientos realizados se pudo observar que la parte occidental del área presenta mejores condiciones para la acumulación de uranio y torio en estas zonas predominan rocas tipo lutitas con contenidos de materia orgánica y presencia de sulfuros como pirita, así mismo calizas grises oscuras con intercalaciones de limolitas pertenecientes a las formaciones Paja y Tablazo, este tipo de rocas son un ambiente para la fijación de minerales secundarios de uranio y torio forma en la que se podría presentar minerales radiactivos en este tipo de rocas. Por otra parte en la zona Oriental se presentan los mayores contenidos de potasio principalmente en Calizas y arcillolitas pertenecientes a las formaciones Rosablanca y Paja, a su vez formaciones como Tablazo resultaron también ser importantes ya que la alternancia de lutitas con capas calcáreas podría arrojar resultados de mayor interés para la presencia de Uranio y Torio.

Las tres zonas identificadas como de mayor interés resultaron ser congruentes con los tipos de rocas aflorantes y las condiciones nombradas en la literatura para que se den este tipo de minerales. Cabe anotar que algunas de las áreas espacializadas mediante el modelamiento realizado no fueron visitados en la exploración este resultado nos indica que las mediciones de gamma espectrometría son muy importantes pero que realizar procesos como el desarrollado en el presente trabajo permiten identificar nuevas áreas además de brindar mayor información para realizar muestreos geoquímicos y la concentración de esfuerzos en las nuevas etapas de exploración

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

Las variables seleccionadas permitieron representar la radiactividad del área de estudio e integrar información geológica, histórica, geoestadística, gamma espectrométrica.

El modelamiento y predicciones realizadas a través del análisis Geoestadístico permitieron concluir que la distancia de muestreo no fue la más óptima para la presentación del proceso espacial en particular para el caso del uranio.

Al observar los rangos obtenidos en la estimación del semivariograma se puede indicar que el torio y el potasio presenta un fenómeno de auto correlación mas fuerte que para el uranio.

Se identificaron tres zonas de interés localizadas principalmente en las Formaciones Paja, Tablazo y Rosablanca.

Con la presente investigación no solo se mostraron áreas importantes para el Uranio también se realizó la revisión e investigación de minerales como el Torio que actualmente constituyen un elemento estratégico en la producción de energía nuclear.

La Formación Arcabuco compuesta por areniscas cuarzosas principalmente presento los mejores contrastes al aplicar las diferentes relaciones entre bandas.

4.2 Recomendaciones

Luego de evaluar el valor del efecto pepita el cual para las tres variables está por encima del 50% y de identificar que este no es debido a errores de medición ya que los equipos utilizados fueron calibrados y se tuvieron en cuenta las recomendaciones dadas por la Comisión de Energía Atómica se podría indicar que este es causado a un error de microestructura del fenómeno estudiado por tanto se recomienda realizar diseños de muestreos más detallados y considera distancias menores en la toma de datos en futuras exploraciones a lo largo de este tipo de rocas.

El modelo da una información preliminar sobre zonas favorables para la acumulación de minerales radiactivos en las condiciones presentes en el área de estudio pero cabe anotar que en esta zona solo se presentan rocas sedimentarias, en condiciones con mayor diversidad de tipos de rocas y ambientes de formación de las mismas los criterios a evaluar en el componente geológico deberán integrar más aspectos que los propuestos en el presente trabajo.

Ya que la acumulación del Uranio está relacionada con el contenido de materia orgánica se recomendaría tomar información sobre los contenidos de esta con el fin de integrarla al modelo y evaluar con más criterios las zonas de interés.

Las rocas en el presente estudio son rocas sedimentarias las cuales son depositadas en estratos de diferentes espesores por tal razón estudios estratigráfico complementarían la exploración así mismo se podrían buscar alternativas para integrar información de este tipo al modelamiento realizado.

Según el análisis preliminar elaborado a través de sensores remotos y la revisión bibliográfica realizada en el presente trabajo se pudo establecer que el empleo de imágenes satelitales en la exploración de minerales radiactivos requiere una investigación profunda ya que se debe tener en cuenta aspectos como el tipo de roca que condicionara el ambiente de acumulación del mineral, las lecturas de radiactividad y

la resolución espectral de la imagen, a su vez es necesario trabajar la información en forma conjunta con el fin de establecer correlaciones ya que comparar solo las mediciones de gamma espectrometría podría limitar los resultados alcanzados.

Bibliografía

Aber, JS., (2013). Landsat Image Processing ES 351, ES 771, ES 775. Emporia State University. Departamento de geología. Disponible en http://academic.emporia.edu/aberjame/remote/landsat/landsat_proc.htm [Consultado El 14 De Octubre De 2011]

Arezo, M. (2012). Sensores Remotos Satelitales en la Medición del Impacto Ambiental en Minería. Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich". España.

Asfahani, J., Aissa, M., Al-Hent, R. (2005). Statistical factor analysis of aerial spectrometric data, Al-Awabed area, Syria: a useful guide for phosphate and uranium exploration. Appl. Radiat. Isot. 62, 649–661

Asfahani, J., Aissa, M., Al-Hent, R. (2008). Aerial gamma spectrometric survey as a tool for evaluating the uranium remobilization degree: Case study from Al-Awabed area, Northern Palmyrides, Syria Appl. Radiat. Isot, 1262-1274

Asfahani, J., Aissa, M., Al-Hent, R. (2009). Uranium statistical and geological evaluation of airborne spectrometric data in the Al-Awabed region and its surroundings (Area-3), Northern Palmyrides, Syria Appl. Radiat. Isot. 67, 654–663

Aligarh Muslim University. Disponible en <Http://Translate.Google.Com.Co/Translate?Hi=Es&Langpair=En|Es&U=Http://Www.Cps-Amu.Org/Sf/Notes/M14a-4-8.Htm>. [Consultado 22 de octubre de 2010]

Ahmed, A. Madani, (2008). Utilization of Landsat ETM+ Data for Mapping Gossans and Iron Rich Zones Exposed at Bahrah Area, Western Arabian Shield, Saudi Arabia Department of Mineral Resources and Rocks, Faculty of Earth Sciences, King Abdulaziz University Earth Sci., Vol. 20 No. 1, pp: 35-49

Ayuda en línea de ArcGis 2010 disponible en <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/005p00000023000000> [consultado el 13 de noviembre de 2010]

Buccianti, A., Apollaro, C., Bloise, A. (2009). Natural radioactivity levels (K, Th, U and Rn) in the Cecita Lake area (Sila Massif, Calabria, Southern Italy): An attempt to discover

correlations with soil features on a statical base, Elsevier Science Lt, Geoderma 152, 145-156

Babaglio, D., Magni, C., Pieck, D. (2007). Espectrometría gamma con Detectores de NaI y Ge (Li) Instituto Balseiro – Bariloche, Argentina. Informe N°3:

Bonham, C., G., (1996). Geographic information systems for geoscientists. Modelling with GIS.

Carranza, M. (2009). Handbook of exploration and environmental geochemistry. Volume 11 Geochemical Anomaly and mineral prospectivity mapping in Gis. (1a. ed.)

CNA- Comisión Nacional de Energía Atómica. (2012). Recursos uraníferos no convencionales. Taller: minería hacia el futuro. Universidad Nacional de San Martín, Prov. Buenos Aires 28 de agosto de 2012

Cuador, J. (2002). Estudios de estimación y simulación geoestadística para la caracterización de parámetros geólogo - industriales en el yacimiento laterítico punta gorda. (Resumen de tesis doctoral) Minería y Geología, vol. 21, núm. 4 Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Díaz, M. (2002). Geoestadística aplicada. Cuba. Instituto de geofísica, UNAM. Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA

Exploración de Recursos Naturales. Parte 1: Revisión metodológica.- GEOLOGÍA COLOMBIANA, 31, 27-38

Figueras, M., Gargallo, P. (2003). "Análisis Exploratorio de Datos", [en línea] 5campus.com, [2012,24, Abril]

Funciones de análisis espacial. Universidad Nacional de Colombia [en línea] disponible en http://www.unal.edu.co/siamac/sig/publica/analisis_es.pdf [2011, 10, Octubre]

Ford, K.L. (2001). Reconnaissance gamma-ray spectrometry studies of the Paleoproterozoic Piling Group and adjacent Archean basement rocks, central Baffin Island, Nunavut.

Garriga, A., Riba; Sánchez, J. Cuantificación del valor de la ratio Tm3/Tm1 para la delimitación de actividades extractivas. Dep. Física Aplicada. Universidad Politécnica de Catalunya.

García, O., Moreno, S. (2006). Herramientas de Análisis Estadístico y Espacial aplicadas en la separación Línea Base – Anomalía Geoquímica. Implicaciones en INGEOMINAS.

Garzón, L. (1978) .Radiactividad y Medio ambiente. Technology & Engineering. 179 p. Universidad de Oviedo

Geochemical Services, INC. (1991) Average Abundance of the Elements (ppm). 2741 Toledo Street, Suite 211, Torrance, California 90503.

Giraldo, R. (2002). Introducción a la geoestadística teoría y aplicación. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

González, L., Muñoz, R., Vargas, S. (2008). Exploración de uranio en la región de Paipaza-Chivata, Departamento de Boyacá, INGEOMINAS, Bogotá.

González, L., Muñoz, R., Vargas, S. (2010). Exploración de uranio en la región de Moniquira, Departamento de Boyacá, INGEOMINAS, Bogotá.

González, L., Espinoza, A. (2011). Hallazgo de yacimientos de sales de potasio en Colombia Servicio geológico Colombiano SGC, Bogotá.

Gerasimovskii V. I. (1957). On the modes of occurrence of uranium in rocks, The Soviet Journal of Atomic Energy December Volume 3, Issue 6, pp 1407-1411.

Gudberto, J; León R. Apuntes de Métodos Estadísticos I , Universidad de los Andes – Escuela de Estadística. Mérida -Venezuela

Helvar, F. (2010). Autocorrelaciones [en línea] disponible en <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/rfranco/tematico.htm#autocorrelaciones> [2011,7 de mayo]

Hengl, T., Heuvelink, B.M., Stein, A. (2004). Generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-Kriging Geoderma 120, 75-93

IAEA (International Atomic Agency). (2003). Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data, Vienna. Austria.

Kreuzer, O., Markwitz, V., Porwal, A.K., McCuaig T.C., (2010). A continent-wide study of Australia's uranium potential. Part I: GIS-assisted manual prospectivity analysis, Ore Geology Reviews 38. 334–366

Liendo, P. (2003). Prospección geofísica de los radioelementos uranio, torio, potasio y minerales para genéticos asociados. Universidad Central, Caracas, 1-419p.

Lamorey, G., Jacobsom, E. (1995) Estimation of Semivariogram Parameters and Evaluation of the Effects of Data Sparsity, Mathematical Geology, Vol.27, No.3, pp. 327-358.

Longley, P., Godchild, M et al. (2001): Geographic Information Systems and Science, John Wiley & Sons, Chichester. Capítulos 13 y 14, páginas 277-324

MARTÍNEZ, L.; ZINCK, A (1994). Modelling spatial variations of soil compaction in the guaviare. ITC Journal, Enschede, n.3, p.252–262,

MARTÍNEZ, L.; ZINCK, A. (2004). Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of colombian amazonia. Soil & Tillage Research, Amsterdam, v.75, n.1, p.3–18.

Narváez, G. (2002). Marco teórico conceptual de la geoestadística. Capítulo 2. [En línea] Disponible en <http://www.google.com/#hl=es&sa=X&ei=T7FTciHBcTr0QGrqbmsCA&ved=0CCUQBSgA&q=definicion+kriging+en+geoestad%C3%ADstica+y+tipo+de+k> [2011, 07 de Mayo].

Nicolás, H. (2004). Métodos estadísticos en problemas espaciales. Tesis de maestría en estadística aplicada, Universidad Nacional de Tucumán. Instituto de Investigaciones Estadísticas. San Miguel de Tucumán. Mexico

O'Dea, J. (1998). Spatial analysis of natural radionuclides in peat overlying a lithological contact in Co. Donegal, Ireland *Journal of Environmental Radioactivity*. 107-117p

Oyarzún, R., Álvarez, P., Oyarzún, J. (2002). Espectrometría gamma: un método complementario para determinar la litología de materiales parentales de suelos. Aplicación a un estudio agrologico. *Agricultura técnica* 62 (3):480-488.

Restrepo L, (2007). De Pearson a Spearman. Universidad de Antioquia. *Rev Col Cienc Pec.* 2007; 20:183-192

Rigol-Sánchez. (2011). Análisis e integración de datos espaciales en investigación de recursos geológicos mediante Sistemas de Información Geográfica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Volumen 63, núm. 1, p. 61-70

Samper, F., Carrera, J. (1996). Geoestadística aplicaciones a la hidrología subterránea (2a. ed.) Barcelona. Centro internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña

Sabins, F. F., (1999). Remote sensing for mineral exploration, *Ore Geology Reviews*, 14: 157–183.

Santa, F. (2011) Ejemplo de la construcción de un mapa de predicción por medio de Geoestadística.

Servicio Geológico Colombiano SGC., (2007). Recursos Minerales de Colombia. Bogotá Colombia. Pub N° 29. Tercera Edición.

Speranza, F., Zerda, H. Potencialidad de los índices de vegetación para la discriminación de coberturas forestales.

Samih Al Rawashdeh, El uso de la tecnología de teledetección en la investigación geológica y la detección de minerales en El Azraq, Jordania.

Tarrytown, N. Y., Pergamon. (1996). Elsevier science Ltd., computer Methods in geosciences, vol. 13, 398 p., 1° ed. 1994.

ATOMIC ENERGY COMMISSION, U.S. 1954. Versión al castellano del Folleto de Divulgación "PROSPECTING FOR URANIUM", serie memorandum - N° 1. ministerio de fomento y obras públicas instituto nacional de investigación y fomento mineros, 19 p. Lima

Urquhart D, 1995. Transferring of airborne survey data from tapes. Organismo Internacional de Energía Atómica, informe interno, (inédito), 10 pp, Viena.

Yeung, (2002). Raster based GIS Data processing. Lo, C; A.. Concepts of Geographic information systems, Prentice Hall series. Chapter 5

Yamaguchi, Y., Naito, C. (2000). Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands. Department of Earth and Planetary Sciences, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Japan

Valbuena, C. (2006). Variabilidad espacial del suelo y su relación con el rendimiento de mango. Tesis de Maestría. Universidad nacional de Colombia.

Vargas C. Remote Sensing Geoimage SAC. Procesamiento de Imágenes de Satélite & GIS. Disponible en www.rs-geoimage.c [consultado el 14 de octubre de 2011]

Vernon, E. (1961) . Geology and Geochemistry of Uranium in marine black shales a Review. U.S. Atomic Energy Commission. Washington D.C